INVESTIGACION y CIENCIA

LA FOTOGRAFIA EN LOS SERVICIOS DE INTELIGENCIA

EXPERIMENTACION GENICA EN HUMANOS

COMPLEJIDAD EN LA FRONTERA DEL CAOS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

PLANIFICACION URBANA



MAYO 1996
800 PTAS.



Mayo de 1996 Número 236

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Bruce Morser

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
8	Roberto Osti
9	Chip Clark, Institución Smithsoniana
10	Jimmy Smith, *Islas desde el cielo* (*arriba*); Roberto Osti (*abajo*)
11	Molly Kelly Ryan, Institución Smithsoniana (*arriba*); Sandy Canupp (*abajo*)
12	Ilka C. Feller, Institución Smithsoniana (*arriba*); Chip Clark, Institución Smithsoniana (*abajo*)
13	Molly Kelly Ryan, Institución Smithsoniana (*izquierda*); Klaus Rützler (*derecha*)
15	Ricard V. Solé
16	Ricard V. Solé (*izquierda*); Xavier Espadaler (*derecha*)
17-20	Ricard V. Solé
23	George Mulala
24-25	Laurie Grace y Pete Samek
26	Jessie Nathans
27	Gideon Mendel, Network Matrix
38-39	Tomo Narashima
40	Imagen en blanco y negro cortesía del Buckminster Fuller Institute, Los Angeles; micrografías de Lelio Orci
41	Lelio Orci
42-43	Tomo Narashima (*arriba*); Lelio Orci (*abajo*)
47-48	Fuerzas Aéreas de EE.UU.
49	Fuerzas Aéreas de EE.UU. (*arriba*); Armada de EE.UU. (*abajo*)
50-51	Oficina de Reconocimiento Nacional
52	Departamento de Defensa de EE.UU.
53	Oficina de Reconocimiento Nacional (*izquierda*); Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*derecha*)
54-60	Michael Goodman
62-63	Karl Gude (*izquierda*); Jonas Rabinovitch, cortesía de la ciudad de Curitiba (*derecha*)
64-65	Jonas Rabinovitch
66	Karl Gude (*arriba*); Jonas Rabinovitch (*abajo*)
67-69	Jonas Rabinovitch
70-71	R. Jonathan Rehg; Philippe Hurlin/GLMR, Gamma Liaison (*inserto*)
72-73	Robert Prochnov
76	Robert Prochnov
84	Michael Goodman
85	Johnny Johnson
87-88	Johnny Johnson

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ana María Rubio: *Epidemia africana de sida*; Esteban Santiago: *Vesículas y transporte intracelular*; Luis Bou: *Arte y ciencia del reconocimiento fotográfico, Juegos matemáticos* y *Hace...*; Juan Pedro Campos: *Los electrones en planilandia*; Joandomènec Ros: *Manglares del Caribe*; Santiago Torres: *Tendencias en genética: Información vital*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad: Josep M.ª Palau y Joandomènec Ros

Ciencia y empresa: Manuel Puigcerver

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

Scientific American: «La televisión en color asoma con fuerza en el horizonte de la radio. La tiene la RCA, aunque considera que aún no puede comercializarse; Columbia Broadcasting System quiere el color a toda costa; Zenith Radio dice que va a producir sólo receptores de televisión en color; y el público espera con mayor o menor paciencia en qué va a parar todo esto.»

«Fundando sus previsiones en precios de 15 dólares la tonelada de carbón, los expertos en energía atómica predijeron no hace mucho que la energía atómica podría, en un plazo de tres a veinticinco años, empezar a competir económicamente con el carbón para la producción industrial de energía eléctrica. Según un director del Instituto del Carbón Bituminoso, el precio indicado es desmesurado, pues en la actualidad se está suministrando el carbón a los productores de energía eléctrica a precios cuyo promedio nacional es inferior a 6 dólares la tonelada; por tanto, se tardará "algo así como dos o tres generaciones antes de que el carbón bituminoso haya de temer algo de la energía atómica".»

...cien años

Scientific American: «La primera solución verdaderamente práctica al problema del vuelo artificial ha sido conseguida por el profesor Samuel Langley, secretario de la Institución Smithsoniana. El profesor Alexander Bell describe así los experimentos, realizados con éxito cerca de Occoquan, en Virginia, el 6 de mayo: "El aerodromo, esto es, la máquina voladora en cuestión, era de acero y estaba impulsada por un motor de vapor. Tal un pájaro enorme, elevóse en el aire con extrema regularidad trazando amplias curvas, volando sin cesar hacia arriba en una trayectoria espiral, hasta alcanzar una altura de unos 30 metros tras un curso de unos 800: hasta que se agotó el vapor y se detuvieron las hélices que movía. Entonces, para ulterior sorpresa mía, el conjunto, en lugar de caer pesadamente, se posó con tanta lentitud y elegancia como pudiera hacerlo un pájaro." Las superficies de sustentación tienen algo más de 5 metros de punta a punta.»

«Las máquinas reproductoras de sonido no son menos maravillosas que los aparatos para transmitirlo, y aunque la máquina parlante pudiera no hallar tan amplio campo de aplicación como el teléfono, tal vez sea más interesante e instructiva. El grabado adjunto ilustra el gramófono en su última versión, obra del inventor Emile Berliner. Lo mueve una correa que rodea la polea grande sobre el eje de la manivela, que se acciona a mano. Sobre el plato giratorio se coloca el disco de goma endurecida, que contiene la grabación. La caja de sonido está montada sobre un brazo oscilante, que sostiene también el resonador cónico. Con cinco minutos de práctica, hasta un niño puede manejarlo y reproducir con afinación perfecta una canción o una pieza de una banda.»

La nueva máquina parlante

«Año tras año, las leyes de las galernas se van comprendiendo mejor merced a los infatigables esfuerzos del servicio hidrográfico de los Estados Unidos. Mal puede el hombre de tierra adentro apreciar lo que el gobierno ha hecho para proteger de peligros a los barcos. La medición de las tormentas requería la obtención de datos fiables sobre amplias extensiones oceánicas. A falta de estaciones telegráficas, fueron entregados formularios para el registro de observaciones a todos los capitanes de los navíos que tocaron cualquier puerto norteamericano, que debían cumplimentar y remitir a Washington. En pago a tal labor, cada capitán recibía gratuitamente la Carta Mensual del Piloto. A partir de la pila de datos recibidos se construyó un mapa de cada tormenta, y se prepararon instrucciones que les son proporcionadas a los navegantes cuando se encuentran una tormenta en el mar.»

«La Sociedad Médica de Berna ha inaugurado un plan para suprimir de la prensa las reseñas de suicidios, habiéndose observado que las epidemias de suicidios son provocadas por "sugestión", fruto de las descripciones de la prensa.»

...ciento cincuenta años

Scientific American: «*Cuadrúpedos de Norteamérica*, de Audubon. —Esta gran obra, cuya publicación está en curso (más de la mitad hállase terminada ya) es de valor para el naturalista, amén de interés más que ordinario para el público general. Los dibujos son de Audubon; su vivacidad y verismo superan cuanto hayamos visto, sin excepción siquiera de su otra obra, *Aves de América*. En algunos animales —el mapache, por ejemplo— el pelaje se ha trabajado con tal exquisitez y transparencia que induce a creer, a primera vista, que está adherido, en lugar de pintado sobre una superficie plana.»

«Existe una abundancia de calórico en los elementos comunes, que podría ser beneficiado a bajo costo, de ser hallado un método expeditivo y barato de liberarlo de su estado latente. Y tal vez llegue un tiempo en que sea el *agua* el combustible más barato, y pueda hacerse que nos procure luz y calor. Al calórico latente se le suele denominar calor latente, aunque nosotros pensamos que *no* es calor en sentido alguno, en tanto no es liberado y hecho palpable.»

Manglares del Caribe

Pese a su ubicuidad y su posición prominente entre la tierra y el mar, estos ecosistemas tropicales encierran todavía innumerables sorpresas para los investigadores

Klaus Rützler e Ilka C. Feller

Un bosque de árboles mellados y retorcidos que surgen de la superficie del mar, raíces ancladas en fango profundo, negro y maloliente, copas verdes que se elevan hacia un sol deslumbrante, y con insectos zumbando por todas partes. Estas son las primeras impresiones que un visitante recibe conforme se acerca a uno de los paisajes habituales de las costas tropicales: un manglar. Tierra y mar se entretejen allí donde la línea que divide el océano y el continente se difumina. En este entorno, el biólogo marino y el ecólogo forestal deben trabajar en los límites extremos de sus disciplinas respectivas.

Hace tiempo que los naturalistas tratan de definir, en términos ecológicos adecuados, el ambiente de un manglar. ¿Se trata de una forma extrema de arrecife coralino o de un bosque costero inundado? Si se compara con las áreas forestadas tropicales del interior de algunos continentes (que pueden albergar hasta 100 especies de árboles en una sola hectárea), un manglar resulta insignificante, monótono y depauperado. La entera costa del Indopacífico, que es bastante rica, sólo puede presumir de unas 40 especies de mangle, los árboles típicos de los manglares. En el hemisferio occidental sólo hay unas ocho especies de mangle. Y de este pequeño conjunto, sólo tres especies son realmente comunes.

La palabra “mangle” encierra cierta equivocidad. No remite a ningún grupo taxonómico formal, sino que se aplica a plantas vasculares que comparten diversos mecanismos fisiológicos para vivir en agua marina somera. Por ejemplo, los mangles excluyen la sal de sus tejidos o la excretan. Pueden asimismo producir raíces aéreas que permiten el intercambio de gases para la respiración aerobia. Esta adaptación permite la supervivencia de los árboles a pesar de hallarse firmemente enraizados en suelos intermareales desprovistos de oxígeno. Aunque no necesitan para su desarollo un hábitat salado, las comunidades de mangles se forman sólo cerca del mar porque no pueden competir con éxito con la flora de aguas dulces.

Los mangles requieren, además, condiciones relativamente suaves. Lo mismo que los corales, no pueden sobrevivir allí donde la temperatura media del agua descienda por debajo de unos 23 grados Celsius. Tal exigencia explica el que encontremos, a lo largo de los litorales tropicales, bandas de manglares y de arrecifes coralinos que crecen principalmente en fajas paralelas. Pero las desviaciones de este modelo simple son frecuentes. Por ejemplo, las costas sometidas de continuo a grandes entradas de sedimento (como el litoral de Africa occidental) y las zonas de surgencia de aguas profundas y frías hacia la superficie (como las aguas costeras frente a Venezuela oriental) carecen de arrecifes coralinos, pero pueden sustentar manglares extensos. A la inversa, ciertas islas coralinas



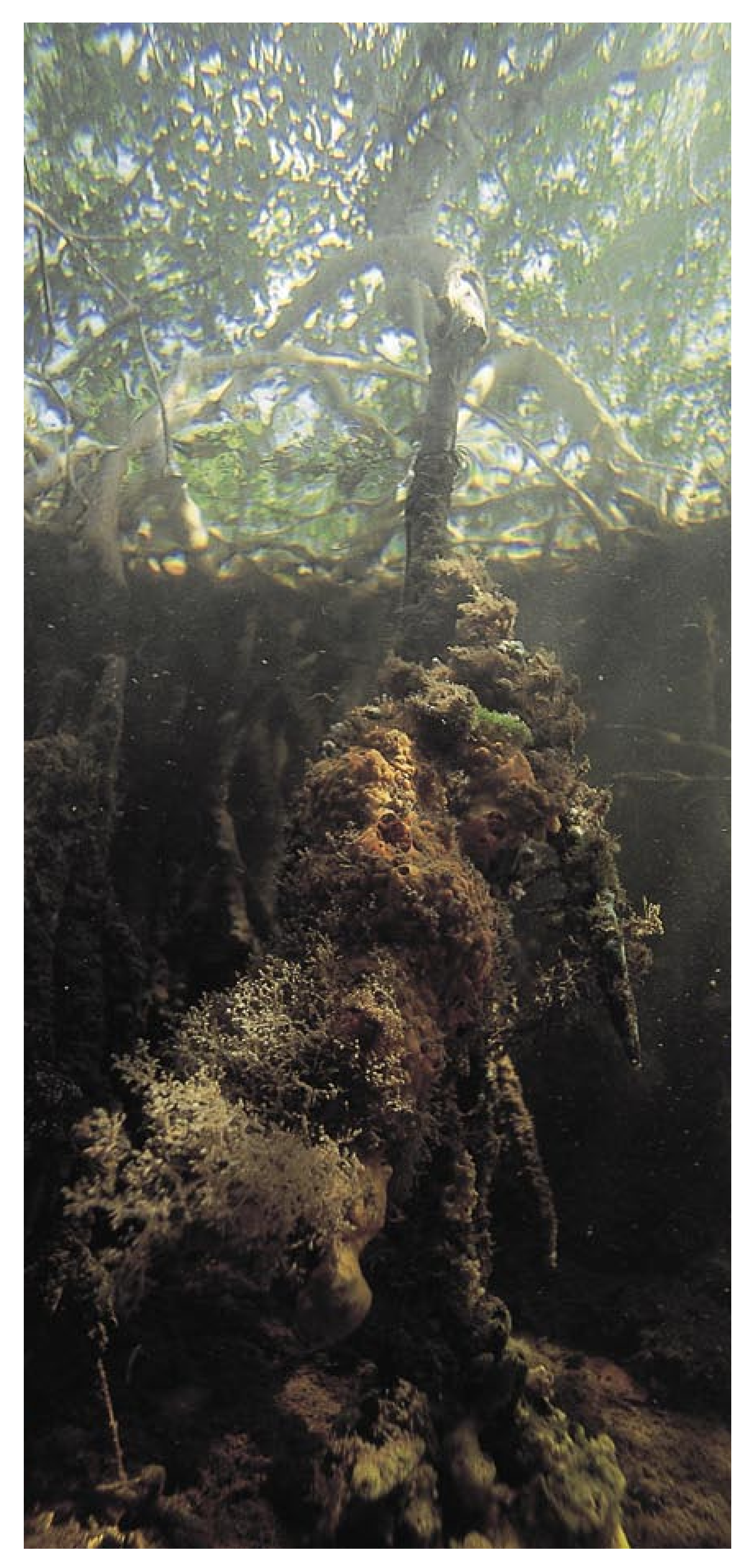
1. LAS COSTAS TROPICALES de todo el mundo suelen estar bordeadas por manglares (*arriba*). Los mangles, árboles tolerantes a la sal, medran en riberas donde la temperatura media se mantiene suficientemente cálida. Los autores realizan su investigación en los manglares del arrecife barrera que bordea Belize (*encuadre*). Bajo la bóveda umbría de los árboles y alrededor de las raíces de los mangles, permanentemente sumergidas, estos manglares (*página siguiente*) albergan ricas comunidades de plantas y animales. En los pantanos de manglar medra, asimismo, un grupo característico de organismos que se han adaptado a la vida en el estrecho intervalo entre los niveles superior e inferior de las mareas.

del Pacífico central carecen de un borde acompañante de manglares, por la razón manifiesta de que los propágulos flotantes que sirven de semillas para estos árboles no pueden alcanzar esos remotos lugares.

Los manglares se inscriben en dos categorías generales de clasificación: continentales e insulares-oceánicos. Pertenecen a los primeros las comunidades que bordean las costas continentales y que, por ello, se encuentran permanentemente encajadas entre el agua salada del mar y el agua dulce aportada por los ríos del interior. De ahí que los manglares continentales tengan que habérselas con una variación pronunciada de salinidad a lo largo de toda su extensión. Esta situación difiere bastante de la que caracteriza a los manglares insulares-oceánicos, que se forman en plataformas someras o en áreas lagunares alejadas del continente. Suelen estar menos afectados por el agua dulce transportada lateralmente que por los cambios intermitentes de salinidad que resultan de la intensa evaporación o de los frecuentes chubascos tropicales.

Aunque el interés por la biología de los manglares se remonta por lo menos a las expediciones de Alejandro Magno al mar Arábigo, el conocimiento científico de este ecosistema intrigante sigue siendo rudimentario, y la mayoría de las preguntas clave siguen sin respuesta. ¿Son los manglares tan ricos y productivos como otros ambientes tropicales? Su papel en la protección de etapas juveniles de peces, ¿es en realidad tan importante como se ha sugerido? ¿Sirven los manglares para salvar de la erosión la línea de costa? Pese al estudio tenaz de los expertos, no se acababa de entender el funcionamiento armónico de los diferentes componentes de sistemas naturales tan complicados.

Ante los magros resultados obtenidos por una investigación dispersa, decidimos acometer una campaña a largo plazo y ceñida a un lugar. Nos propusimos abordar la biodiversidad y la ecología de una zona accesible: el espectacular arrecife barrera que está frente a la costa de Belize. Desarrollamos nuestro trabajo de campo asentados en una estación permanente situada en una minúscula isla coralina a unas 10 millas mar adentro. Uno de nosotros (Rützler) descubrió el lugar cierta mañana de febrero de 1972, durante una excursión realizada con Arnfried Antonius.





2. LAS ISLAS de Carrie Bow (*en primer término*) y Twin Cays (*centro*) han servido de base permanente y laboratorio natural para los autores. Las líneas de trazos sobre el fondo de la laguna revelan las cicatrices abiertas en las praderas de fanerógamas marinas; en ellas, a lo largo de los años sesenta, los equipos de prospección petrolífera utilizaron explosivos para efectuar estudios de sísmica.

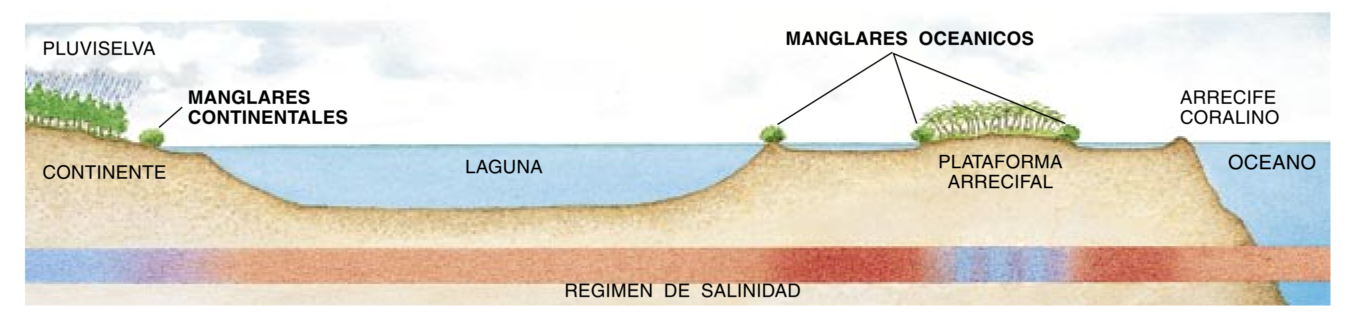
KLAUS RÜTZLER e ILKA C. FELLER estudian los manglares desde puntos de vista complementarios. Rützler es biólogo marino, Feller ecóloga forestal. Rützler, que se doctoró por la Universidad de Viena, en 1965 se incorporó al Museo Nacional de Historia Natural de la Institución Smithsoniana. Feller se halla adscrita al Centro de Investigación Ambiental de la Smithsoniana en Edgewater.

Habíamos alquilado una barquita en la metrópoli, Belize, a 50 millas al norte. Buscábamos un paso entre los bajíos, a través del cual habíamos navegado antes varias veces. Pero la tripulación no estaba familiarizada con las aguas de la zona y se extravió. A medida que el motor nos impulsaba mar adentro podíamos oír el ruido de chapoteo del oleaje al romperse sobre el coral somero, pero ninguna de las dos islas que aparecieron ante nosotros se parecía a lo que recordábamos de nuestras visitas anteriores. Distinguimos varios edificios en la menor de ellas. ¿Qué sería esa muestra de civilización en medio de un entorno silvestre y bastante remoto? Amarramos la embarcación en el muelle de hormigón de la isla y nos dirigimos hacia la mayor de las casas. No había habitantes que nos recibieran (aparte de unos pocos pelícanos a los que nuestra presencia perturbó ligeramente), pero del dintel de la puerta principal colgaba un rótulo: “Bienvenidos a la isla de Carrie Bow”.

No sabíamos entonces que este grano de arena con tres casitas y dos cobertizos era propiedad de Henry T. A. Bowman, un plantador de cítricos apasionado por el mar que había adquirido la isla en 1943 con el fin de construir una casa de verano para su esposa, Carrie. Como tampoco podíamos imaginar que, al cabo de ocho años, el interés de la familia Bowman por las ciencias naturales y su apoyo transformarían este rincón escondido de descanso en laboratorio permanente, laboratorio que desde entonces ha recibido a más de 70 científicos procedentes de 40 instituciones, lo que ha permitido llevar a cabo cientos de estudios de los arrecifes de los alrededores.

Al disponer de la isla de Carrie Bow como base, centramos nuestro examen de los manglares en los cercanos Twin Cays (Cayos Gemelos), zona de manglar prácticamente intacta que cubría más de un kilómetro cuadrado de una laguna somera. Hoy superan la veintena el número de investigadores del Museo Nacional de Historia Natural (de la Institución Smithsoniana) que estudiamos de forma sistemática las comunidades del manglar de Twin Cays. A los que debemos sumar una cifra similar de colegas de instituciones colaboradoras de las dos Américas, Europa y Australia.

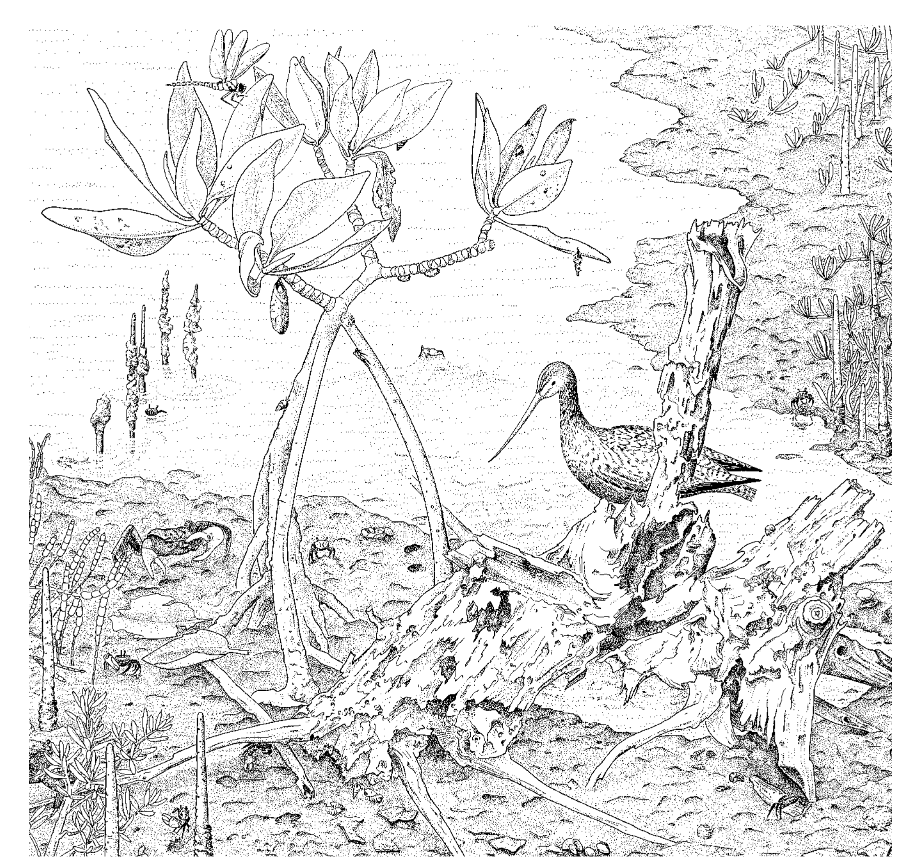
Los manglares de Twin Cays pertenecen al tipo insulares-oceánico. La distribución de los manglares, dispersos entre los retazos de arrecife, nos sugería que los árboles que colonizaron Twin Cays podían haberse instalado sobre distintos grupos de corales. Idea que se rechazó tras la exploración sedimentológica de Ian G. Macintyre. Varios “testigos de vibración” (muestras geológicas obtenidas al introducir un tubo vibrante en el interior del fondo sedimentario no consolidado) revelaron que los mangles de Twin Cays no iniciaron su formación sobre coral. La comunidad del manglar se estableció hace unos 7000 años sobre lo que era una simple elevación de terreno. Desde entonces, el manglar ha venido construyendo un cimiento de siete metros de suelo turboso, en respuesta al nivel creciente del mar.



3. EL ARRECIFE BARRERA DE BELIZE está separado de la costa por una laguna amplia y somera. Las comunidades de manglares continentales (*izquierda*) soportan un gradiente lateral permanente de salinidad de las aguas, allí donde el agua dulce (*color azul en la banda*) da paso a condiciones salinas (*rojo*). Los manglares situados en aguas exteriores (*derecha*) se hallan sometidos con más frecuencia a fluctuaciones erráticas en la salinidad.

La topografía de Twin Cays refleja varios miles de años de historia natural y da fe de la potencia de las incontables tormentas y huracanes que han asolado ese minúsculo bosque. Por ejemplo, en el canal somero que biseca la isla y después se escinde, con una rama sin salida, queda evidencia clara de al menos un acontecimiento espectacular del pasado. En los recodos del extremo cerrado existen cortes profundos que todavía no se han rellenado con turba o sedimento. Estas excavaciones sumergidas indican que fluyeron libremente fuertes corrientes a través del paso antes de que una tormenta no registrada depositara suficiente sedimento para represar un extremo del canal.

La periferia de Twin Cays y de sus canales está ribeteada por altos mangles rojos (*Rhizophora mangle*) cuyas raíces, parecidas a zancos, trascienden el banco de turba que sostiene los árboles para hundirse en el agua más profunda. Hacia el interior, primero el mangle negro (*Avicennia germinans*) y después el mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) delimitan zonas de agua de inundación somera y de llanos de fango extensos, que se desarrollan acompasados al ciclo de la marea. Bajo un sol intenso, se evapora gran cantidad del agua estancada, razón por la cual la salmuera que queda en las charcas abunda en concentración de sal. Karen L. McKee ha encontrado que las condiciones hipersalinas del extremo superior de la zona intermareal favorecen a los plantones de mangle negro, porque esta especie es la que tiene mayor tolerancia a la sal. Los plantones de mangle blanco no pueden sobrevivir a la salinidad ni a la inundación periódica que afecta a esta región; se hallan, pues, confinados a terrenos más altos. El mangle rojo domina en los tramos inferiores de la zona intermareal, no sólo porque se sostiene sobre raíces en forma de zancos, sino también porque sus plantones resisten mejor los rigores del ambiente de frontera (penurias entre las que se cuentan escasez de nutrientes y abundancia de posibles depredadores).





4. ENTRE LOS RESIDENTES SUPRAMAREALES del manglar hay una amplia diversidad de plantas, artrópodos y caracoles. La aguja marmórea (*Limosa fedoa, el ave del dibujo*) no tendrá ninguna dificultad en encontrar alimento.

El interior de Twin Cays está tapizado por numerosos estanques someros y planicies de fango. Algunas de éstas carecen de árboles; en otras existen tocones erosionados de ejemplares que antaño debieron de elevarse a gran altura. Hay bajíos cubiertos por formas enanas de mangle rojo. Aunque estos árboles chiquitos apenas alcanzan el metro, podrían tener ya varios decenios. Al principio supusimos que el estrés fisiológico asociado con la salinidad creciente y la temperatura elevada de las planicies de fango explicaban el lento crecimiento de esos mangles parecidos a bonsáis. Pero mediante experimentación directa, uno de nosotros (Feller) comprobó que este crecimiento achaparrado en Twin Cays, y en islas de manglar similares de Belize, era el resultado de la carencia de un nutriente crítico, el fósforo.

Tradicionalmente, los naturalistas han destacado la transición lateral de los bosques de mangles continentales, desde el dominio casi oceánico de la costa hasta las regiones de aguas dulces, el ámbito de la pluviselva, pasando por el ambiente estuarino

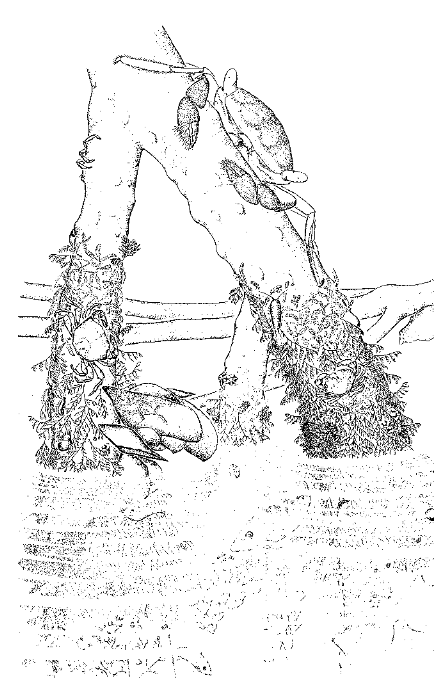
de las desembocaduras y corriente arriba. Esta variación horizontal no adquiere una caracterización llamativa en Twin Cays. Sí existe en la isla una estratificación vertical bien desarrollada, que comprende la bóveda arbórea, la región intermareal y una zona parecida a un arrecife por debajo del agua, incluso de la más calmada. Una parte sustancial de nuestra investigación se ha centrado en el examen de la flora y la fauna de estos tres ambientes distintivos.

Insectos en número infinito, lagartos, serpientes y aves viven en el interior de los niveles superiores del bosque en Twin Cays. Aunque los insectos constituyen el grupo más abundante, han de desenvolverse en un medio para ellos rigurosísimo con un sol implacable y falta de agua dulce. Sólo unas cuantas especies son activas durante el día; la mayoría evitan los rayos del sol alimentándose por la noche o haciendo su vida en el interior de las plantas. Todo ello supone que con los métodos tradicionales de caza de insectos (mediante trampas, cebos o rociando la vegetación con plaguicidas) se obtienen pocos ejemplares. Nosotros seguimos otro camino: cortamos partes de plantas y recogimos larvas, las criamos después y así encontramos que la fauna de insectos del manglar presenta una diversidad y un interés ecológico muy superiores a lo que se les venía atribuyendo.

Las ramas vivas de mangle rojo albergan varias especies de polillas y escarabajos expertas en la perforación de la madera. Los estadios larvarios de estos insectos se alimentan en el interior de las ramitas, creando cilindros huecos de madera seca. Una vez emergen tales excavadores primarios, otras 70 especies de hormigas, arañas, ácaros, polillas, cucarachas, termes y escorpiones utilizan las ramitas ahuecadas como alimento y como lugares en los que cazar, anidar y refugiarse del sol lacerante.

Por diversas e interesantes que sean, las comunidades animales suspendidas por encima del nivel más alto de la marea son similares en muchos aspectos a las que se observan en otros bosques tropicales. Pero los ambientes forestales más profundos, de raíces de zancos de mangle rojo, neumatóforos de mangle negro, bancos de turba y planicies de fango, albergan habitantes que son exclusivos de los manglares.

En Twin Cays la amplitud normal de la marea es de sólo unos 20 centímetros. Pese a ello, sus bosques de mangles poseen comunidades intermareales distintivas, que ocupan el estrato empapado entre los niveles superior e inferior de las mareas. Las raíces aéreas aparecen cubiertas por una combinación de algas rojas que están especialmente adaptadas para la retención del agua cuando la marea se retira. Estas superficies duras sirven también de soporte para cirrípedos, ostras y cangrejos. Vive en esa zona intermareal un curioso pececillo, el ciprinodóntido de los manglares (*Rivulus marmoratus*), descubierto en Twin Cays por William P. Davis y D. Scott Taylor; esta especie hermafrodita constituye uno de los raros ejemplos que ofrece la naturaleza de un vertebrado que puede clonarse a sí mismo.





5. LAS RAICES de mangles en forma de zancos situadas en la zona intermareal se hallan recubiertas por especies de algas que forman la asociación denominada *Bostrychietum*. Dichas superficies albergan muchos invertebrados; así, la ostra de los mangles (*Isognomon*) y el cangrejo de los mangles (*Aratus*).

Pero el hábitat más rico y más densamente poblado del manglar, con mucho, rodea el área submareal de las raíces de zancos del mangle rojo. Colonizan ese espacio varias especies de algas, esponjas y anémonas, entre otros. Esos organismos forman tapices que recubren las raíces de zancos y ofrecen alimento y refugio a una fauna variopinta, con ostras y cangrejos de los mangles incluidos. Nuestros experimentos demuestran que las raíces no atraen de forma particular a los organismos epibiontes. Después de un mes de exposición a estas aguas, cualquier material no tóxico (maderas distintas, plástico o vidrio) se recubre de manera similar, primero con un revestimiento mucoso, microbiano, y después con diversas algas e invertebrados. Las raíces de los mangles parecen beneficiarse de este proceso. Aaron M. Ellison y Elizabeth J. Farnsworth han demostrado que la comunidad epibionte protege a los árboles, al menos parcialmente, del ataque de animales perforadores de las raíces.

El fondo sedimentario del pantano submareal está cubierto por densas praderas de fanerógamas marinas, sobre todo en los canales bien iluminados. En algunos lugares del fondo medran algas y medusas. El sedimento consiste en una mezcla de arena, fango y detritos, en continua agitación por el agua en movimiento y por la actividad de diversos organismos. Grandes animales que se alimentan sobre el fondo, como los manatíes, labran el canal con frecuencia, como lo hacen veloces barcas a motor. Y lo que es menos evidente, pero reviste mayor importancia, gusanos poliquetos y crustáceos remueven sin cesar el sedimento; lo excavan a la manera de las lombrices de tie-





6. LAS COMUNIDADES SUBMAREALES incluyen gusanos sabélidos que viven entre la gran cantidad de hojarasca en putrefacción (*izquierda*) y la esponja de fuego del Caribe (*Tedania ignis*), una especie hermosa aunque tóxica (*arriba, junto a algas y ascidias*), que puede provocar graves inflamaciones dérmicas.

rra y los topos. Peter Dworschak y Jörg Ott han demostrado que algunos crustáceos pueden excavar y mantener complejas madrigueras de túneles que se ramifican y se extienden cerca de dos metros en el interior del fondo fangoso.

El examen de las algas, los invertebrados acuáticos y los insectos de Twin Cays ha descubierto un número sorprendente de nuevas especies. Dentro incluso de grupos bien estudiados, como los crustáceos, se ha observado que un 10 por ciento de las especies allí encontradas eran desconocidas. Según nuestros cálculos, podríamos cifrar en un 20 o 30 por ciento el número de especies no descritas de los microorganismos, algas, esponjas y gusanos que viven en Twin Cays.

La riqueza de la vida contenida en el manglar de Twin Cays despierta la preocupación inmediata ante las amenazas que se ciernen sobre la biodiversidad de estos delicados ambientes conforme van cayendo en manos de los seres humanos. La tala de manglares dificulta, si no impide, su recuperación. Una vez cortados, se producen cambios irreversibles en la estructura fundamental del ecosistema.

Observamos esa secuencia trágica en una parcela de mangle negro que cortaron los pescadores en el lado occidental de Twin Cays. La planicie mareal, convertida en yermo, no tardó en cubrirse de barrillas (un pequeño arbusto que puede tolerar la salinidad elevada), reduciendo así el espacio disponible para nuevos árboles de mangle negro, que se reproducen con mayor lentitud. Allí donde el borde natural de mangle rojo resultó perturbado, las corrientes generadas por el viento y las mareas erosionaron rápidamente el suelo rico en turba y dejaron una superficie del fondo sobre la que los propágulos de los plantones tenían dificultades para anclarse.

Nuestros experimentos de campo pusieron de manifiesto otro impedimento que evita la instalación de nuevos mangles tras la tala. Comprobamos que los plantones de mangle arraigan y crecen a la sombra mucho mejor que a cielo abierto, lo que indica que la reparación de los manglares dañados puede resultar demasiado lenta para el ritmo veloz de la erosión de la tierra denudada.

Tales observaciones nos llevan a la conclusión de que los manglares constituyen sistemas naturales sumamente delicados. Pese a que el gobierno de Belize ha promulgado leyes que protegen sus especies de mangle, se trata de árboles vulnerables al interponerse en el camino del desarrollo comercial al uso. Como ocurre en otras costas de todo el mundo, el hombre tala los árboles y terraplena las zonas bajas para construir viviendas e instalaciones industriales.

De no haber sufrido esa agresión destructiva, los manglares habrían alojado una variedad enorme de animales, entre ellos juveniles de peces de aguas profundas. Pérdidas que amenazarán cada vez más la riqueza natural del océano, cerca y lejos de la costa. No obstante, el interés creciente por la degradación ambiental en el seno de las naciones en vías de desarrollo ha despertado el interés de los expertos por la biología de los manglares. Aunque queda mucha tarea por hacer, y en ello se está, la investigación realizada en Twin Cays ha permitido reunir un conjunto de observaciones a largo plazo que son fundamentales. El conocimiento adquirido habrá de ayudar a prever con más acierto el destino de las frágiles costas de la Tierra, así como fomentar una legislación rigurosa que sirva para proteger las fascinantes comunidades de manglar que allí se encuentran.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ECOLOGY OF MANGROVES. A. E. Lugo y S. C. Snedaker, en *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 5, págs. 39-64. 1974.

MANGROVE SWAMP COMMUNITIES. K. Rützler e I. C. Feller, en *Oceanus*, vol. 30, n.º 4, págs. 16-24; invierno 1987-1988.

THE BOTANY OF MANGROVES. P.B. Tomlinson. Cambridge University Press, 1995.

Complejidad en la frontera del caos

Los hormigueros, la macroevolución, las selvas tropicales y el cerebro comparten un rasgo común: son sistemas complejos, dotados de propiedades especiales a medio camino entre el orden y el desorden

Ricard V. Solé, Jordi Bascompte, Jordi Delgado, Bartolo Luque y Susanna C. Manrubia

La física nos demuestra que podemos construir una imagen coherente del universo partiendo de principios básicos a menudo muy simples. Nos basta con la mecánica de Newton para entender el movimiento de los cometas y predecir sus trayectorias. Se trata de leyes deterministas, en las que dadas ciertas condiciones iniciales, si nos referimos al cometa serían la posición y velocidad, el futuro del sistema está ya definido. Determinismo y predicción parecen indisociables.

El determinismo newtoniano se tambaleó con la llegada de la mecánica cuántica. Esta nos hizo ver que el mundo microscópico de los átomos y las partículas elementales posee un límite más allá del cual las certidumbres se convierten en probabilidades. Ya entrada la segunda mitad del siglo XX, un nuevo marco conceptual vendría a introducir nuevos elementos en el cuerpo teórico de la ciencia. Gracias a los trabajos de Illya Prigogine y sus colaboradores, de la Universidad Libre de Bruselas, comenzaron a aplicarse herramientas de la física al estudio de sistemas complejos alejados del equilibrio, fueran éstos químicos o biológicos.

R. V. SOLE, J. BASCOMPTE, J. DELGADO, B. LUQUE y S. C. MANRUBIA están integrados en el grupo de sistemas complejos de la Universidad Politécnica de Cataluña. Solé, director del grupo, enseña en el departamento de física e ingeniería nuclear de la Politécnica. Bascompte es profesor del departamento de ecología de la Universidad de Barcelona. Delgado se halla adscrito al departamento de lenguajes y sistemas informáticos, también en la Politécnica. Luque y Manrubia investigan sobre redes de Kauffman y criticalidad autoorganizada, respectivamente.

Habíase observado que, en determinadas reacciones químicas y bajo condiciones adecuadas, un sistema que de suyo debería tender hacia un estado de equilibrio homogéneo mostraba oscilaciones periódicas macroscópicas y adquiría unas sorprendentes estructuras espaciales en forma de ondas espirales. Semejante resultado no parecía compatible con la interpretación estricta de la segunda ley de la termodinámica, que nos dice que la entropía y, por tanto, el desorden aumentan siempre. Nada tiene, pues de especial que la información relativa a esos fenómenos se recibiera con escepticismo, si no con incredulidad. Boris Belousov, uno de los pioneros, vio rechazado el artículo donde exponía su investigación porque, en opinión del editor de la revista en que debía publicarse, su “descubrimiento supuestamente descubierto” (*sic*) era del todo imposible. La reticencia inicial no impidió que empezaran a verse estructuras de ese tenor en multitud de sistemas físicos, químicos y biológicos.

Más tarde, con el descubrimiento del caos determinista en sistemas dinámicos simples se demostró que, tras fenómenos manifiestamente complicados, subyacía un orden oculto. Una sola ecuación determinista podía generar dinámicas aparentemente aleatorias o erráticas que jamás se repetían. Y lo que era aún más sorprendente: los fenómenos caóticos eran, pese a su carácter determinista, impredecibles. Bastaba una imprecisión mínima en nuestro conocimiento de las condiciones iniciales (por ejemplo, en las variables climáticas locales en un instante dado) para que aquélla se propagara exponencialmente hasta convertir la predicción en pura entelequia, alejada de la evolución real. Se había puesto la primera piedra de una futura teoría de la complejidad.

Pero complejidad no era, necesariamente, sinónimo de complicación. Lo que sí se exigía era abandonar nuestra intuición lineal de los fenómenos y reemplazarla por una visión del mundo basada en la no linealidad. A finales de los ochenta, el empleo de ordenadores cada vez más potentes, sumado al desarrollo de nuevas herramientas matemáticas, permitía comprobar que tanto la geometría como la dinámica de muchos sistemas naturales podían abordarse desde enfoques simples.

Se fue aceptando la existencia de propiedades emergentes, que aparecen en un sistema no lineal como resultado de la interacción entre sus partes y que no pueden explicarse a partir de las propiedades de sus elementos componentes. Una colonia de hormigas, por ejemplo, es capaz de llevar a cabo tareas de gran complejidad, como explorar su entorno, construir galerías o decidir la fuente de alimento entre dos posibles a escoger. Pero, consideradas una por una, ninguna puede acometer, por sí sola, semejantes tareas. Decimos que el comportamiento social del hormiguero emerge a partir de interacciones entre

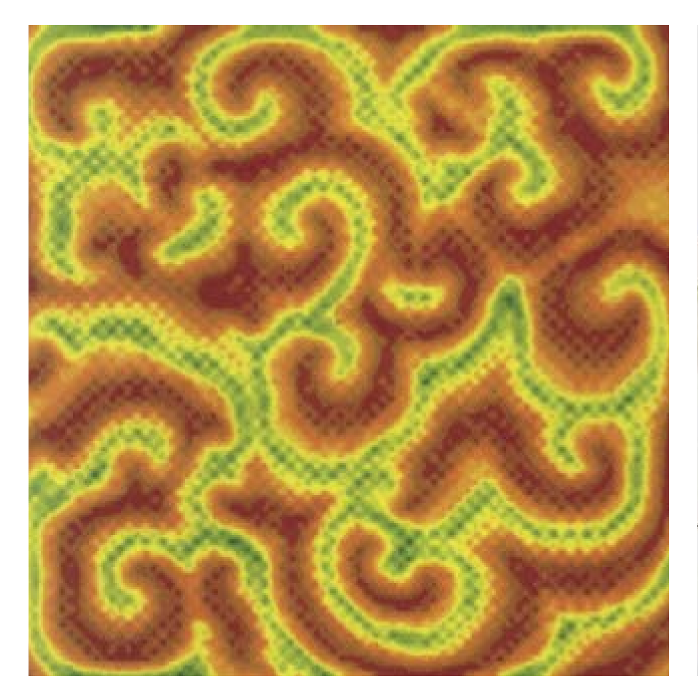
1. EL ORDEN puede surgir espontáneamente en sistemas químicos. En esta figura vemos el resultado de una simulación tridimensional por ordenador de la reacción de Belousov-Zhabotinski, obtenida por Mario Markus y Benno Hess, del Instituto Max Planck. Las zonas más claras indican una mayor concentración de uno de los reactivos. Partiendo de una mezcla homogénea de sustancias químicas, el sistema se autoorganiza dando lugar a ondas macroscópicas, observables a simple vista, que surgen del desorden molecular.

las hormigas (elementos simples), y no es reducible a las propiedades de un individuo de la colonia. Lo mismo ocurre con el cerebro y las neuronas que lo forman o con un ecosistema y sus especies componentes.

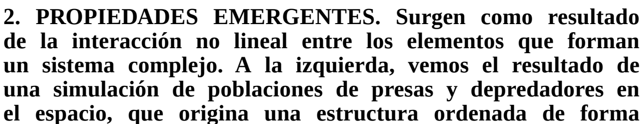
Se trata, en definitiva, de sistemas complejos, y como tales sus propiedades emergen de las interacciones entre sus elementos componentes. Muy pronto se comprendió que los sistemas complejos aparecen a medio camino entre el orden y el desorden. Por un lado, el orden es necesario para almacenar información y mantener la estabilidad de las estructuras. Pero también se precisa flexibilidad en la transmisión de información. Recientemente, y desde enfoques distintos, se ha propuesto una hipótesis general acerca del origen de la complejidad. La han elaborado, entre otros, Jim Crutchfield, de la Universidad de California en Berkeley, Stuart Kauffman, del Instituto de Sistemas Complejos de Santa Fe, Chris Langton, del Centro de Estudios No Lineales en Los Alamos, y Per Bak, del Laboratorio Nacional de Brookhaven. La hipótesis de la frontera del caos, como se la denomina, establece que la complejidad aparece en unas condiciones muy especiales, conocidas desde antaño por la física: los puntos críticos en los que tienen lugar las transiciones de fase. Los sistemas complejos serían el resultado de una evolución hacia dichos puntos.

Hallamos un ejemplo de este tipo de transiciones en un trozo de hierro cuando lo enfriamos lentamente desde cierta temperatura. Asociemos el sólido a una red de pequeños imanes, para los que supondremos que sólo hay dos estados posibles: arriba (+1) y abajo (–1). Dos elementos del imán adyacentes adoptarán la misma orientación, la de mínima energía, siempre que no haya perturbaciones externas que lo impidan. A alta temperatura, la interacción es insignificante y los elementos están desordenados, por lo que no se aprecia ninguna estructura ma-









2. PROPIEDADES EMERGENTES. Surgen como resultado de la interacción no lineal entre los elementos que forman un sistema complejo. A la izquierda, vemos el resultado de una simulación de poblaciones de presas y depredadores en el espacio, que origina una estructura ordenada de forma espontánea. A la derecha, un conjunto de hormigas da lugar, a través de sus interacciones, al comportamiento colectivo de la colonia. A su vez, la dinámica global restringe la de sus elementos. Sin embargo, la dinámica global no puede reducirse a la dinámica de sus unidades constituyentes.

croscópica. A baja temperatura, los elementos interaccionan entre sí, se establece cierto orden y crean un imán permanente homogéneo. En el punto crítico, conocido como temperatura de Curie, orden y desorden coexisten. Esta coexistencia conlleva la aparición de una propiedad muy frecuente en los sistemas complejos naturales: las estructuras fractales (o sibisemejantes), que se caracterizan por presentar el mismo aspecto básico a distintas escalas.

Otros fenómenos complejos —movimientos sísmicos, dinámica de montones de arena o macroevolución— tienden de forma espontánea hacia el punto crítico. Pese a su dispar naturaleza, tales sistemas exhiben propiedades comunes. En todos ellos encontramos elementos en interacción que poseen la capacidad de amplificar perturbaciones fortuitas. Estas pueden ser, según el caso, pequeñas tensiones en las placas tectónicas, caída de un grano de arena sobre el montón o aparición de nuevas especies. La amplificación de la perturbación inicial puede provocar grandes cambios; por seguir con los ejemplos: terremotos intensos, avalanchas o extinción de especies. Si medimos la intensidad de los terremotos en función del número de seísmos, la curva obtenida sigue una distribución decreciente: los terremotos de poca intensidad son mucho más frecuentes que los de mayor intensidad.

Existen muchas funciones decrecientes, ya sean de tipo lineal, exponencial, etcétera. Forman, de hecho, un conjunto infinito. Sin embargo, de entre este conjunto de soluciones sólo una —las llamadas leyes potenciales— se corresponde con el comportamiento de un sistema en el punto crítico [*véase cuadro*].

Abundan en la naturaleza los fenómenos en que se manifiestan leyes potenciales. Donde éstas se cumplen puede descubrirse, también, la existencia de propiedades fractales. La selva tropical nos puede servir ahora de guía. Una fracción de los ecosistemas que componen la pluviselva contiene un número ingente de especies distintas. A la hora de explicar semejante biodiversidad compiten dos teorías. La primera, que llamaremos de equilibrio, postula que la diversidad es el resultado de una larga coevolución en un ambiente estable. Las especies han pugnado hasta ocupar los distintos nichos ecológicos ya predefinidos. La segunda teoría, de no equilibrio, parte de la observación de que los ecosistemas que han sufrido ya sea una escasa perturbación, ya sea una intensa perturbación, muestran una biodiversidad limitada, en tanto que los ecosistemas que han experimentado un grado de perturbación intermedia entre ambos extremos suelen desarrollar mayores niveles de diversidad de especies.

Las perturbaciones impiden que la competencia entre especies sea sin cuartel ("competencia incompleta") y generan, además, nuevas oportunidades y microclimas. Las perturbaciones del ecosistema pueden ser exógenas y endógenas. Un ejemplo típico de perturbación endógena nos lo da la caída de los árboles en la selva. Hablamos de árboles que alcanzan hasta 60 metros de altura, cubiertos de gigantescas lianas. Una vez abatido, el árbol deja un claro en el dosel de la vegetación por donde la luz irrumpe en el suelo. Las condiciones de temperatura y humedad se ven modificadas bruscamente y las semillas que dormitaban inician una carrera por ocupar el vacío que se acaba de abrir. Pero a veces la caída de uno arrastra a otros árboles vecinos, pudiendo entonces generar claros de cientos de metros cuadrados de superficie.

El estudio de la dinámica de los claros demuestra que contribuyen de forma muy importante al mantenimiento de la diversidad. ¿Podría ser la dinámica de los claros observada la resultante de un fenómeno crítico? Así es. Dos de los autores, Solé y Manrubia, analizaron un mapa de los claros de la pluviselva panameña de Barro Colorado, que se había cartogra-

fiado a principios de los ochenta. El estudio preliminar permitió concluir que este ecosistema mostraba una estructura fractal. La distribución de tamaños de claros era, además, de tipo potencial, según cabía esperar de un sistema en el punto crítico.

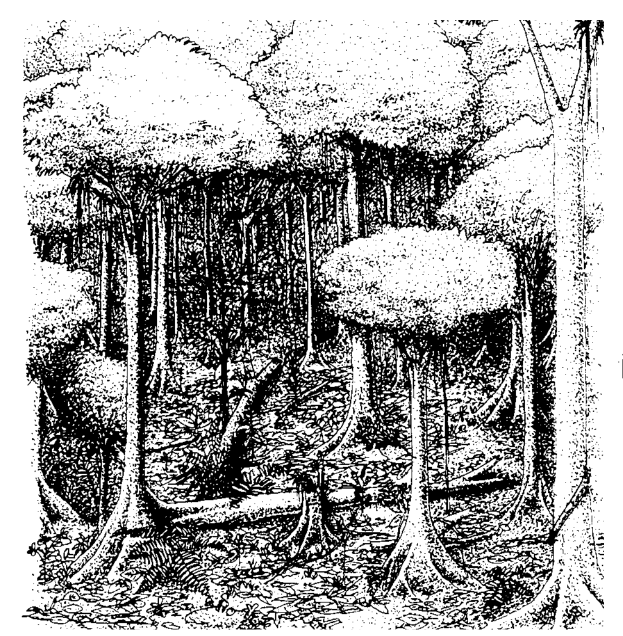
Este resultado apoyaba la hipótesis de la existencia de fenómenos naturales que siguen leyes potenciales, al par que demostraba que el sistema se hallaba en un estado de no equilibrio. Para corroborar sus conclusiones y generalizarlas, los integrantes del grupo de sistemas complejos de la Universidad Politécnica de Cataluña desarrollamos un modelo de simulación por ordenador, en el que el bosque original, formado por unas 200 especies arbóreas, se sustituía por un conjunto de autómatas celulares del mismo tipo (como si fuera una sola especie), dispuestos sobre una rejilla bidimensional, donde cada uno interaccionaba sólo con sus vecinos. Introdujimos reglas de nacimiento y muerte muy simples, así como un algoritmo de interacción entre elementos que imitaría la competencia por la luz y los recursos. Por último, dimos cabida a la caída de árboles: en nuestra simulación el árbol que moría destruía totalmente la zona circundante, cuya extensión era proporcional al tamaño del árbol caído.

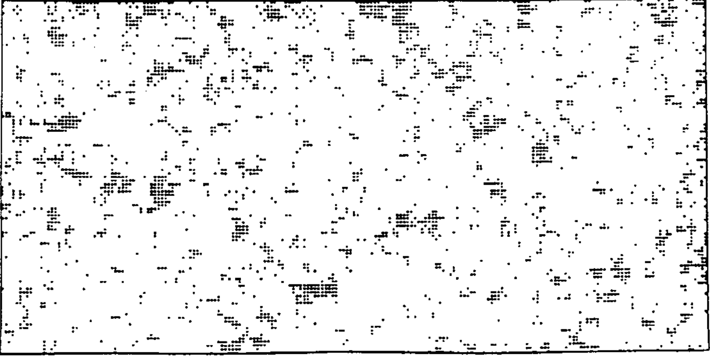
Pese a la simplicidad de las reglas empleadas, las propiedades observadas en los puntos críticos son esencialmente las mismas, se siga un modelo general u otro más detallado. Si nuestro sistema estaba en un punto crítico, el modelo debía ser capaz de reproducir todos los fenómenos recogidos en el mapa de campo.

El modelo computacional mostraba distintos comportamientos, unos muy ordenados y otros muy desordenados. A medio camino entre ambos extremos, la mortalidad, la intensidad de interacción u otros parámetros se sitúan en el dominio de lo que esperaríamos como biológicamente razonable. A esa franja o dominio le hemos dado el nombre de bosque complejo, donde la comparación entre los datos procedentes del bosque real y los generados por el modelo muestra un ajuste cuantitativo sorprendente. El resultado de la simulación es virtualmente idéntico al bosque observado, lo que sugiere que el mapa del bosque real es una fotografía de un sistema complejo en el punto crítico, tal y como predice la conjetura. El modelo permite, además, simular experimentos totalmente inaccesibles al ecólogo de campo, como observar y medir las fluctuaciones de la biomasa a lo largo del tiempo. Estas fluctuaciones son también de tipo fractal.

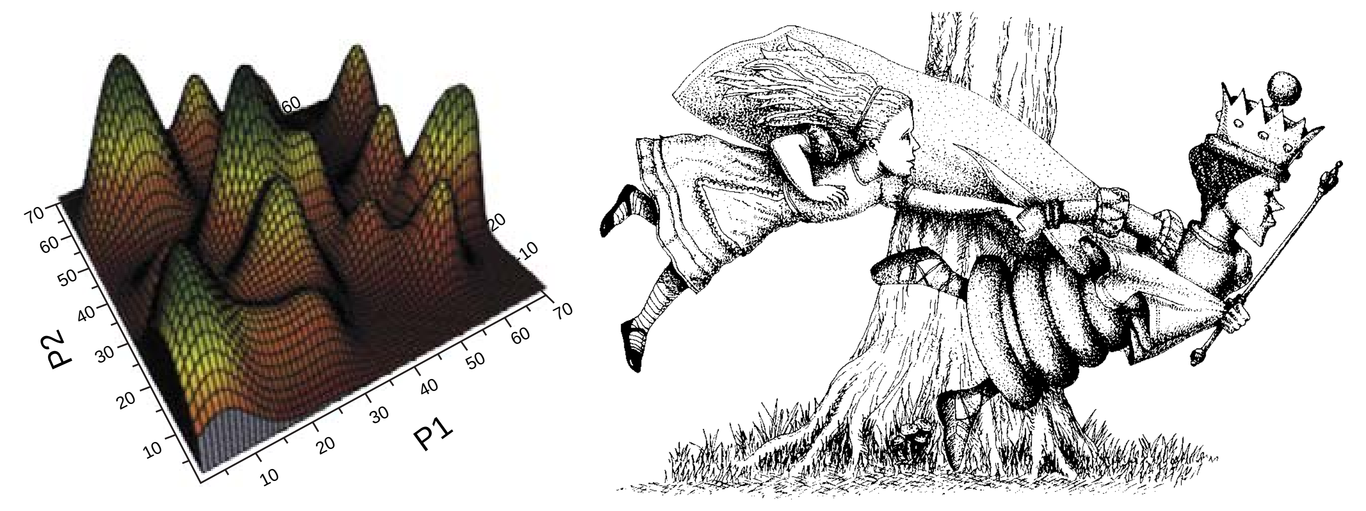
Podríamos preguntarnos si, como sugiere la teoría, estas propiedades de los puntos críticos (no linealidad, emergencia y sibisemejanza) se presentan en todos los sistemas complejos, es decir, si son universales. Tomemos un ecosistema muy alejado del hasta aquí estudiado: las poblaciones de retrovirus, el del sida por ejemplo, que son virus dotados de un genoma de ARN. El término retrovirus alude a su capacidad de copiar ARN en ADN mediante una enzima específica, la transcriptasa inversa. La presencia del virus desencadena una respuesta inmunitaria. Esta respuesta sería contundente si los virus no modificaran la estructura molecular de las proteínas de su cápside a través de mutaciones génicas. La tasa de mutación de los retrovirus es altísima, según ha puesto de manifiesto Martin Nowak, de la Universidad de Oxford, quien ha analizado la relación existente entre esa frecuencia y la longitud del genoma vírico. La transcriptasa inversa comete —en el caso del virus del sida— entre 1 y 10 errores por tanda de replicación, lo que supone una tasa de mutación un millón de veces mayor que la de un genoma celular típico. Esta tasa de mutación, concluye Nowak, es la óptima para eludir la respuesta inmunitaria.

Sin embargo, la mutabilidad no puede alcanzar niveles arbitrariamente desmesurados, porque entonces esas partículas infecciosas perderían su identidad biológica y eficacia. Volvemos, pues, a encontrarnos con los dos extremos anteriores: orden (población vírica totalmente homogénea) y desorden (una colección de moléculas aleatorias). Adviene una dificultad añadida: la aparición de una amplia colección de formas mutantes no permite hablar de "especie" en un sentido estricto, sino de "cuasiespecies moleculares", definidas por Manfred Eigen y Peter Schuster, del Instituto Max Planck en Göttingen. El modelo matemático de Eigen y Schuster describe la evolución de una población en la que existe una secuencia maestra, que es la que se reproduce más eficazmente. Si la replicación está acompañada de mutaciones, la población estará formada por la secuencia maestra y sus mutantes: la cuasiespecie.





3. ESTRUCTURAS FRACTALES creadas por la caída de un árbol, fenómeno común en cualquier bosque. A la derecha se muestra un mapa de la selva de la isla de Barro Colorado (Panamá). El rectángulo es de 1 Km × 0,5 Km, y los puntos negros indican zonas de la bóveda forestal con una altura inferior a 10 metros, reflejando la caída reciente de árboles. El análisis de este mapa revela que se trata de un gigantesco fractal vivo, muy posiblemente resultante de la evolución de la selva hacia un estado crítico.



4. PODEMOS IMAGINAR el conjunto de posibilidades accesibles a una especie mediante un relieve adaptativo. Imaginemos, para una especie determinada, dos propiedades (P1, P2) que la definen, como longitud y peso, o velocidad y color. Para un ecosistema dado, existirán combinaciones mejores y peores. El grado de adecuación de tales combinaciones, esto es, su capacidad para favorecer la supervivencia de una u otra especie del ecosistema, se refleja en el paisaje adaptativo que nos indica la puntuación de cada par. Las especies tenderán en principio a ocupar alguno de los máximos. Sin embargo, cada especie posee un paisaje adaptativo que resulta de su interacción con el ambiente y con el resto de especies. Cuando se da un cambio, los paisajes adaptativos se modifican y todas las especies deben reajustar su posición. Esta dinámica, que puede llevar a un cambio constante, en el que están en juego la persistencia (y no una mejora adaptativa) da lugar a una carrera de la Reina Roja (*derecha*) en la que el sistema cambia sin cesar.

Explorando la tasa de mutación, nuestro modelo computacional adaptado a la población de retrovirus permite demostrar la existencia de transiciones de fase. Para tasas de mutación muy bajas, la secuencia maestra domina y la población mutante es un residuo que se deriva de la primera. Pero a medida que la mutabilidad crece, la secuencia de mutantes va ganando terreno hasta que, para una tasa de mutación crítica, la población se convierte en un conjunto de secuencias aleatorias y el virus, como entidad biológica, desaparece. Se ha alcanzado lo que en la teoría de Eigen se denomina la catástrofe de error.

En las poblaciones de retrovirus reales, hallamos valores de la tasa de mutación muy cercanos a la catástrofe de error. Los retrovirus, pues, muestran un comportamiento complejo en la frontera entre orden y desorden. Schuster ha demostrado, mediante argumentos teóricos, que este punto crítico confiere al retrovirus la máxima adaptabilidad frente a la selección constante llevada a cabo por el sistema inmunitario.

La explicación de la complejidad a través de los puntos críticos en las transiciones de fase halla también respaldo en el comportamiento de los insectos sociales. El éxito evolutivo de estos artrópodos reside en su capacidad para operar como un solo organismo. Mas, para obtener un comportamiento global coherente, es preciso que las interacciones entre individuos den lugar a correlaciones que abarquen el sistema entero. ¿Emerge este orden global en un punto crítico, en el filo del caos? Nuevamente, los modelos teóricos, que predicen la existencia de una transición de fase, se ven respaldados por las observaciones experimentales.

El grupo de Nigel Franks, de la Universidad de Bath, estudió la autoorganización de las colonias de hormigas del género *Leptothorax*. Estas colonias muestran un comportamiento global sorprendente. Si contamos el número de individuos activos (en movimiento, realizando alguna tarea) a lo largo del tiempo, comprobaremos que el número fluctúa con una periodicidad de unos 25 minutos. Cada cierto tiempo, pues, ningún elemento muestra actividad de ninguna clase.

Podríamos creer que esta periodicidad está ya definida en cada hormiga componente de la sociedad, de suerte que el ciclo de actividad sólo fuera un reflejo de su sincronización. Pero los experimentos son concluyentes: la actividad individual es totalmente aperiódica, caótica para ser exactos, sin ningún tipo de regularidad intrínseca. Al agregar individuos, vemos la aparición paulatina de un comportamiento colectivo hasta que, para cierta densidad de hormigas, comienzan a aparecer las oscilaciones. Si seguimos aumentando el número de elementos hasta densidades mucho mayores que las naturales, estas oscilaciones se tornan regulares. Y, una vez más, el comportamiento global surge de la interacción entre las partes, al par que controla la actividad de cada una de ellas.

Una observación experimental adicional indica que las colonias suelen poseer una densidad de hormigas alrededor de un valor muy bien definido. Si intentamos modificar su entorno para aumentar la densidad, la colonia redefine sus fronteras (acarreando material cercano) para volver a su densidad natural. Este resultado señala que existe una densidad crítica en la que el sistema se comporta como un todo, a medio camino entre orden y desorden.

Para desentrañar ese fenómeno de los insectos sociales, Solé introdujo en el modelo computacional la noción de red neural fluida. Las redes neurales se han venido empleando, desde principios de los ochenta, en modelos de sistemas cognitivos muy diversos. Estos modelos permiten reproducir propiedades colectivas de los sistemas neurales, como la memoria asociativa, partiendo de elementos e interacciones simples. En las sociedades de insectos, en el sistema inmunitario y en las redes de ordenadores encontramos, además, una propiedad nueva: la fluidez, que se manifiesta cuando las conexiones entre elementos cambian con el tiempo como consecuencia del movimiento al azar o por otras causas. Debido a la fluidez, faltan en el hormiguero la memoria a

largo plazo y otras propiedades que atribuimos al cerebro.

Solé, en colaboración con Octavio Miramontes, del Colegio Imperial de Londres, y Brian Goodwin, del Instituto de Santa Fe, desarrollaron un modelo basado en redes neurales fluidas en el que se profundiza en las analogías entre un hormiguero y el cerebro. En el modelo, cada hormiga pasa a ser una neurona; las interacciones entre distintas neuronas son las habituales en una red neural clásica. El modelo cuenta con una propiedad adicional, peculiar de los hormigueros reales: la activación espontánea de los individuos. Después de quedar inmóvil, un individuo puede volver a la actividad ya sea por interacción (otro individuo activo lo activa) o de forma espontánea. Las activaciones espontáneas son caóticas, y como tales se introdujeron en el modelo.

Las simulaciones de ordenador mostraban las mismas propiedades dinámicas observadas en los experimentos de Franks. A baja densidad, las fluctuaciones son muy irregulares; los individuos, aunque se activan, no pueden propagar sus cambios. A grandes densidades, las fluctuaciones del sistema se tornan periódicas, de modo que cuando todos los individuos se han desactivado la activación de uno se propaga en forma de onda coherente a través de todo el sistema. Entre ambos extremos, existe una densidad crítica, en la que aparece una oscilación coherente, aunque no periódica, que, una vez más, constituye una transición de fase.

¿Qué logra el sistema en ese punto crítico? Puesto que el hormiguero en cuanto tal maneja información, podemos analizar en el modelo computacional la transferencia de esa magnitud variable para distintas densidades. Aplicando una herramienta matemática *ad hoc*, la teoría de Shannon, descubrimos que la información transmitida se hace máxima en el punto crítico, a una densidad igual a la observada experimentalmente por Franks.

Este resultado encierra un interés doble. Por una parte, vemos que las hormigas emplean en su desenvolvimiento normal un punto crítico para transmitir información. Pero además constituye la primera prueba de la predicción realizada por Crutchfield y Langton: la computación (entendida aquí como la capacidad de un sistema complejo para captar y procesar información) podría aparecer en la naturaleza en la frontera del caos. Estos autores postularon que una de las propiedades de los sistemas complejos es su capacidad para interaccionar con su ambiente y procesar la información recibida. Para ello se requiere cierto grado de orden interno, que permita almacenar la información. Pero a la vez esta información debe ser manipulable, lo que obliga al sistema a poseer cierta flexibilidad interna, cierto grado de desorden. Las hormigas estudiadas por Franks son, muy posiblemente, el primer ejemplo claro de un sistema natural que lleva a cabo computación en la frontera del caos.

El papel de las propiedades emergentes y su aparición en las proximidades de puntos críticos han movido a algunos a pensar que la evolución biológica a gran escala, la macroevolución, se desarrolla en la frontera del caos. Varias líneas de prueba respaldan esta idea. Por un lado, la fluctuación temporal del número de familias de algunos grupos

Transiciones de fase y complejidad

Existen varios tipos de transición de fase, observables en sistemas físicos químicos y biológicos. Las transiciones de segundo orden están asociadas a sistemas que, al alcanzar el punto crítico, pierden algún tipo de simetría. El cambio de un estado a otro se produce entonces de forma suave, continua. El ejemplo más conocido (junto a las inestabilidades hidrodinámicas) es la transición de fase que experimentan ciertos materiales magnéticos, descrita a través del *modelo de Ising*. En éste, se remplazan los átomos del material por espines con dos direcciones, "arriba" y "abajo", a las que asociamos los valores arbitrarios +1 y –1.

Los espines interaccionan únicamente con sus cuatro vecinos más cercanos (situados a derecha e izquierda, arriba y abajo). Su tendencia natural, definida por la interacción, les hace alinearse adoptando el mismo estado (la configuración de menor energía). A alta temperatura, sin embargo, las perturbaciones de origen térmico interfieren con la interacción, agitando al azar los valores de cada espín. De este modo, el sistema aparece muy desordenado (*figura a*); si sumamos el valor de todos los espines (suma que define la *magnetización*), el resultado es cero. Si enfriamos el sistema, la interacción va ganando terreno sobre la entropía hasta que, para una temperatura crítica dada T_c (la temperatura de Curie), el sistema alcanza el punto crítico (*figura b*), en el que aparecen agregados de espines con la misma dirección de todos los tamaños. De hecho, lo que observamos son estructuras fractales. Si analizamos los tamaños de estos agregados y estudiamos la frecuencia con la que se presentan, encontramos una ley potencial:

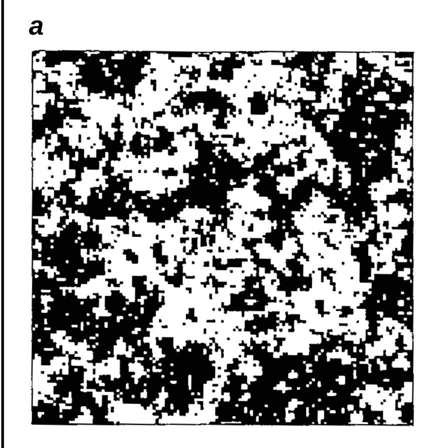
$$N(S) \approx S^{-\beta}$$

donde $N(S)$ indica el número de agregados de tamaño S. Estas leyes potenciales son características de sistemas en estado crítico, aunque no exclusivas de éstos.

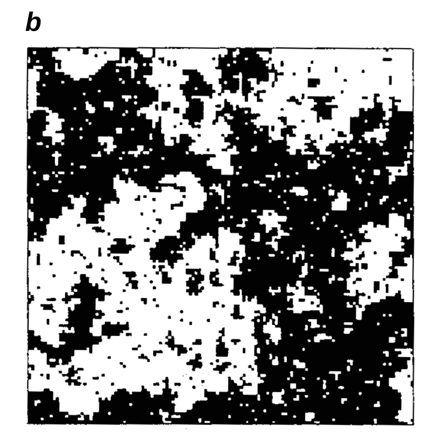
Finalmente, si seguimos enfriando el sistema, la interacción vence al desorden térmico y aparece magnetización espontánea (esto es, $M > 0$) a la vez que se uniformiza espacialmente la distribución de espines, en favor de una dirección dada.

Hemos supuesto que se ajusta externamente un parámetro, la temperatura, con el fin de acceder al punto crítico. Pero, ¿puede un sistema complejo alcanzar espontáneamente dicho punto? Esta pregunta ha sido resuelta de forma muy satisfactoria por el físico danés Per Bak, quien introdujo en 1988 la noción de criticalidad autoorganizada. El ejemplo paradigmático de sistema crítico autoorganizado es tan simple como un montón de arena, sobre el que vamos dejando caer granos lentamente. Una vez hemos alcanzado cierto ángulo máximo (el ángulo de reposo), la caída de un grano puede desencadenar avalanchas de muchos tamaños, que van desde un solo grano arrastrado hasta avalanchas del tamaño del montón de arena empleado. Estas avalanchas poseen una distribución potencial de tamaños, resultante de la aparición de un estado crítico. De forma similar, otros sistemas alcanzarán dicho estado mediante otros mecanismos de evolución. Así, por ejemplo, la aparición de una nueva especie en un ecosistema puede generar un proceso de extinción que afecte a una, dos e incluso a muchas otras especies.

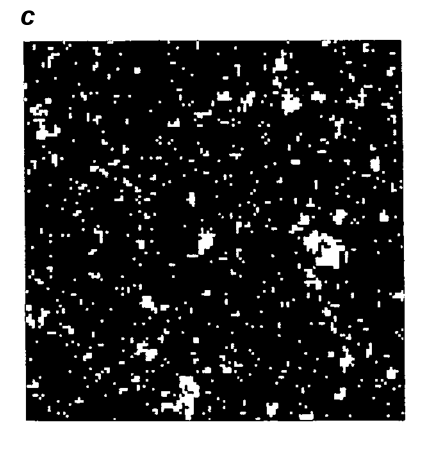
a



b



c



biológicos es compatible con lo que cabría esperar de un sistema crítico. Por otro, el proceso evolutivo origina una filogenia que podemos representar en forma de árbol que va ramificándose conforme van apareciendo nuevas especies (u otros taxones). Esta estructura dendriforme es fractal. Lo ha demostrado Bruno Burlando, de la Universidad de Génova, quien ha analizado las relaciones existentes entre distintos niveles taxonómicos (especie-género, género-orden, etc.) y ha descubierto que las regularidades que aparecen en las relaciones entre grupos taxonómicos revelan la existencia de leyes invariantes, aun cuando se cambie la escala taxonómica. Si contamos el número de géneros que contienen una, dos o más especies, vemos que aparecen ordenados siguiendo una distribución potencial, característica de las estructuras fractales.

Disponemos, además, de una información valiosa acerca de la dinámica de la evolución: los espectros de extinción de especies en el tiempo y el alcance de tales episodios. El 99,99 por ciento de las formas vivientes que han aparecido sobre la Tierra se han extinguido. Los procesos de adaptación de las especies al medio y de extinción aparecen íntimamente imbricados en la teoría darwinista de la selección natural. Frente a un medio

cambiante, las especies capaces de adaptarse, en las que se supone cierta variabilidad en el seno de la población, dejan descendencia, mientras que las menos aptas desaparecen.

Si la adaptación confiere ventaja a la especie, cabe entonces presumir que los grupos más persistentes serán los menos propensos a desaparecer, dado que se hallan mejor adaptados al ambiente. Pero del análisis de los patrones de extinción se desprende, por contra, algo muy distinto. La probabilidad de extinción de un grupo cualquiera se muestra constante a lo largo del tiempo, y no depende de cuánto llevara existiendo en el planeta. ¿Cómo resolver esta paradoja?

A principios de los setenta Leigh Van Valen, de la Universidad de Chicago, propuso un enfoque alternativo de la evolución. En su teoría, Van Valen considera las interacciones entre especies como una carrera de armamentos, en la que cada componente, cada especie, intenta mejorar su posición dentro del ecosistema. Ello significa que, además de interaccionar con el medio físico, interacciona con el ambiente biótico, entendiendo por tal las restantes especies. Un cambio en la situación de una especie inducirá cambios en las demás; la alteración operada en éstas influirá, a su vez, en la primera, que, por consiguiente, deberá experimentar otro cambio, y así en idas y venidas sin fin. Ese proceso de mutua interferencia admite una formalización en el marco de la teoría de juegos. En el marco de ésta, llegamos a la conclusión de que la especie cambia sólo para persistir; la selección natural no mejora la adaptación de la especie: sólo la mantiene. Las especies incapaces de cambiar con la celeridad necesaria se extinguen.

Por consiguiente, lo que vemos en el curso de la evolución de las especies son los elementos de un sistema complejo, en el que lo único importante es seguir jugando. De ahí que a esta argumentación de Van Valen se la conozca por hipótesis de la Reina Roja, en referencia al célebre personaje de Lewis Carroll, que le explica a Alicia cómo, para permanecer en el sitio, no hay que dejar de correr. Una consecuencia a la que llega el modelo matemático es, justamente, que las tasas de extinción son constantes.

Bajo esa equiprobabilidad de duración de las especies que aflora en la piel de la macroevolución podría ocultarse una dinámica intrínseca. Kauffman ha elaborado un modelo de evolución que intenta sacarla a la luz. El modelo considera un conjunto de especies relacionadas entre sí y que poseen la capacidad de evolucionar. Cada especie puede cambiar para mejorar su posición en el ecosistema. Al hacerlo, las especies con las que se encuentra relacionada se resienten en su adaptación y deben, a su vez, cambiar para reforzarla. Todas las especies que intervienen en ese juego siguen, pues, una regla fundamental: han de potenciar su adaptación en el grado en que les sea posible. Cada cambio de una especie obliga a las demás participantes a cambiar, y así el sistema evoluciona hacia un punto crítico.

Una vez alcanzado dicho estado crítico, se aprecia que ciertas partes del sistema permanecen inalteradas durante largo tiempo (no evolucionan) mientras que otras se modifican con rapidez. Ambas situaciones se dan en la naturaleza. Por su parte, el modelo de Kauffman proporciona un marco teórico donde adquieren sentido los datos relativos a las extinciones de especies ya mencionados.

Del modelo de Kauffman se desprende que las propiedades globales de la evolución biológica nacerían de un fenómeno de tipo dinámico que algunos autores han denominado atractor evolutivo. Esta definición pone de manifiesto la existencia de un estado final que atrae el sistema hacia el punto crítico. Una vez alcanzado, la propia búsqueda de una mejor adaptación por parte de los elementos genera inestabilidades que se propagan a todas las escalas. Las inestabilidades, por su parte, pueden arrastrar consigo a las especies que las generaron, razón por la cual las extinciones, incluidas algunas de las principales, vinieron causadas por una inexorable dinámica crítica.

El funcionamiento del cerebro humano, por fin, constituye otro ejemplo de un sistema complejo cercano a un punto crítico. La aplicación de la teoría del caos al estudio de las ondas cerebrales indica la existencia de caos determinista. Se observó también que los estados patológicos de la actividad cerebral mostraban ondas muy ordenadas y ondas muy desordenadas. En estado de normalidad cerebral convergen ambos aspectos: las ondas son aperiódicas pero permiten, al propagarse por la corteza, sincronizar miles de millones de neuronas de forma ordenada. Investigaciones recientes han permitido comprobar que las transiciones de fase pueden desempeñar un papel muy importante en la dinámica del cerebro.

El grupo de Hermann Haken, del Instituto Max Planck en Stuttgart, en colaboración con Scott Kelso, del Instituto de Sistemas Complejos de Florida, ha demostrado que los cambios en la actividad cerebral macroscópica bajo ciertas circunstancias responden a una estructura de transiciones de fase. Mediante técnicas de magnetoencefalografía, se exploró el tipo de transición que presentaba la actividad cerebral en un sujeto experimental bajo ciertas condiciones controladas; éste recibe un estímulo cuya frecuencia va variando lentamente a lo largo del tiempo. Mientras persiste el estímulo externo, y sincronizado con él, el sujeto realiza una actividad física. Para ciertos valores dados del estímulo, la actividad cerebral macroscópica presenta una súbita transición dinámica. El estudio cuantitativo de dicha transición revela un fenómeno crítico. Estos investigadores han sugerido la posibilidad de que el cerebro opere normalmente cerca de estos puntos críticos y han desarrollado un modelo teórico que da cuenta de los resultados obtenidos. Cerca de dichos puntos, el cerebro poseería la capacidad óptima de manejar y procesar información. De ser así, tal vez el sistema más complejo que conocemos se encuentre también en la frontera del caos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A THEORETICAL MODEL OF PHASE TRANSITIONS IN THE HUMAN BRAIN. V. K. Jirsa, R. Fiedrich, H. Haken y J. A. S. Kelso, en *Biological Cybernetics*, vol. 71, págs. 27-35, 1994.

SELF-SIMILARITY IN RAINFORESTS: EVIDENCE FOR A CRITICAL STATE. R. V. Solé y S. C. Manrubia, en *Physical Review*, vol. E51, 6250-6253, 1995.

INFORMATION AT THE EDGE OF CHAOS IN FLUID NEURAL NETWORKS. R. V. Solé y O. Miramontes, en *Physica* D, volumen 80, páginas 171-180, 1995.

PHASE TRANSITIONS AND COMPLEX SYSTEMS. R. V. Solé, S. C. Manrubia, B. Luque, J. Delgado y J. Bascompte, en *Complexity*, vol. 1, páginas 13-26, 1996.

ARE CRITICAL PHENOMENA RELEVANT TO LARGE-SCALE EVOLUTION? R. V. Solé y J. Bascompte, en *Proceedings of the Royal Society* (en prensa).

Epidemia africana de sida

En ciertas regiones del Africa subsahariana casi el 25 % de la población es portadora del virus de la inmunodeficiencia humana, transmitido por vía heterosexual. ¿Qué tiene ello que ver con la circuncisión?

John C. Caldwell y Pat Caldwell

El sida se ha propagado por todo el Africa subsahariana. De los 16 millones aproximados de personas que en el mundo están infectadas por el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), agente causal del sida, dos terceras partes viven allí. La mitad mundial de los casos se dan cita en el cinturón del sida, una cadena de países del Africa oriental y meridional que albergan tan sólo a un 2 por ciento de la humanidad.

El principal medio de propagación del VIH en el Africa subsahariana son las relaciones heterosexuales, en claro contraste con lo acaecido en el mundo desarrollado, donde la transmisión del virus se produce con mucha mayor frecuencia durante las prácticas homosexuales o cuando los consumidores de drogas intravenosas comparten las jeringas contaminadas. Los empeños por detener el aluvión de infecciones en Africa no tendrán éxito mientras no se determinen qué factores de riesgo contribuyen a ese llamativo predominio de la enfermedad entre heterosexuales. Tal diagnóstico permitirá también establecer la probabilidad de que la epidemia heterosexual se extienda o no hacia Asia y Occidente.

JOHN C. CALDWELL y PAT CALDWELL trabajan en el centro de epidemiología y salud pública de la Universidad Nacional Australiana de Canberra. Tanto John Caldwell, demógrafo, como Pat Caldwell, antropóloga, son expertos de la Oficina Sueca para la Cooperación en Investigación que dirigen un proyecto sobre las enfermedades de transmisión venérea y el VIH en el Africa subsahariana. Entre 1970 y 1988 John Caldwell, que fue jefe del departamento de demografía de la Universidad Nacional de Australia, enseña esa misma asignatura en la Universidad de Harvard.

Una de las razones que suelen aducirse para explicar la grave epidemia que azota al cinturón del sida es la del origen. El virus apareció allí y sigue diseminándose desde el epicentro de la enfermedad. Pero los casos de sida surgieron en los hospitales de Uganda y de Ruanda al mismo tiempo que en Occidente. Ninguna de las muestras de tejido humano conservadas, que se tomaron durante los años setenta en estas zonas de Africa, eran VIH positivas. Además, el cinturón del sida no es circular, sino alargado; es decir, no se corresponde miméticamente con el modelo de expansión a partir del epicentro. (Parece más verosímil que otro virus con el sida emparentado, el VIH-2, se originara en Africa, pero infecta a menos personas y tarda más en causar la muerte, razones por las que no lo abordaremos en este artículo.)

Para determinar qué factores podrían fomentar el rápido progreso del VIH en el Africa subsahariana, decidimos volver a examinar todo lo que sabíamos, o creíamos saber, sobre la epidemia. ¿Era cierto que el VIH se transmitía sobre todo a través de las relaciones heterosexuales? ¿Había entre el cinturón del sida y el resto de la región diferencias de comportamiento que pudieran explicar la gravedad de la epidemia en algunos países? ¿Podría estar ligada la sensibilidad al sida a otros problemas sanitarios que compartieran las zonas de mayor infección?

Nos hallábamos en una posición idónea para estudiar la epidemia africana de sida. Durante más de treinta años habíamos venido examinando la dinámica y la fecundidad familiares, así como el control de la natalidad, en el Africa subsahariana. A finales de los años setenta abordamos también la sexualidad y las enfermedades de transmisión venérea; desde 1989 estudiamos los aspectos epidemiológicos, sociales y conductuales de la epidemia africana de sida. Desde 1989 también, hemos contado con la colaboración en Africa de I. O. Orubuloye, de la Universidad estatal de Ondo, Nigeria, y del Grupo de Investigación Africano Occidental sobre Redes de Conexión Sexual, y desde 1991 con la de James P. Ntozi y Jackson Mukiza-Gapere, de la Universidad Makerere de Uganda, así como de John K. Anarfi, de la Universidad de Ghana, y Kofi Awusabo-Asare, de la Universidad de Cape Coast en Ghana.

Transmisión heterosexual

La primera hipótesis que hubimos de examinar era que la propagación del sida en el Africa subsahariana se produce sobre todo a través de relaciones heterosexuales. Albergábamos nuestras dudas, pues en cualquier otro lado el riesgo de adquirir el virus durante el acto carnal heterosexual es extremadamente bajo. Si un varón y una mujer están sanos, salvo por el hecho de que uno de ellos sea VIH positivo, la posibilidad de transmisión del virus durante un solo coito vaginal sin protección es de uno por cada 300 cuando el infectado es el varón y posiblemente de tan sólo uno por cada 1000 si la portadora es la mujer. Este nivel de riesgo contrasta notablemente con la probabilidad mucho mayor de infección durante el coito anal sin protección, cuando se intercambian jeringuillas durante el consumo de drogas o como consecuencia de una transfusión de sangre infectada. Estos medios de transferencia son lo bastante peligrosos como para desatar una epidemia entre sectores restringidos de una población (homosexuales varones y consumidores de drogas intravenosas, por ejemplo), pero no una epidemia social generalizada de la forma que permitiría la transmisión heterosexual.



1. FAMILIAS ENTERAS del Africa subsahariana, entre ellas ésta de la capital de Kenia, Nairobi, sienten el devastador efecto del sida. La esposa (*derecha)* fue infectada por su marido (quien se negó a ser fotografiado). Los tres niños padecen la enfermedad; una cuarta hija ha fallecido ya de sida. Kenia se encuentra en el cinturón del sida, región africana donde la epidemia heterosexual podría persistir, en parte, por la incircuncisión de los varones.

Pese a nuestro escepticismo inicial, las pruebas de una epidemia heterosexual en Africa son convincentes. Mediante estudios elaborados con absoluto rigor se ha demostrado que el índice de infección entre las mujeres es probablemente 1,2 veces mayor que entre los varones y que la mayoría de las mujeres positivas para el VIH fueron contagiadas por sus cónyuges. En Occidente, sin embargo, el número de varones infectados es de cinco a diez veces superior que el de mujeres; allí, la probabilidad de contraer el VIH como consecuencia del consumo de drogas intravenosas o prácticas homosexuales en los varones es mayor que la de las mujeres.

En otras investigaciones se habían descartado ya, para la mayor parte de Africa, los demás métodos característicos de transmisión del VIH. Hemos observado, por ejemplo, que el coito anal se ha considerado detestable por diversas razones, entre ellas, su conexión con la brujería; de ahí que su práctica resulte rarísima en el Africa subsahariana. Por otro lado, en esos países apenas se consume droga por vía intravenosa: aunque el consumo de marihuana está generalizado, la inyección de opiáceos resulta demasiado cara para estas sociedades sometidas a la miseria.

Muchos investigadores occidentales han supuesto que la epidemia heterosexual de sida refleja la existencia de prácticas sexuales peculiares que facilitarían la transmisión. Pero, en términos generales, la actividad sexual en el Africa subsahariana es bastante elemental: incluso en el comercio sexual, se practica poco la estimulación sexual previa al coito o cualquier tipo de violencia que pueda producir sangre. Nos preocupó, sin embargo, que otras tradiciones pudieran convertir en arriesgado el simple acto sexual. Por ejemplo, en algunas partes

El sida en el Africa subsahariana

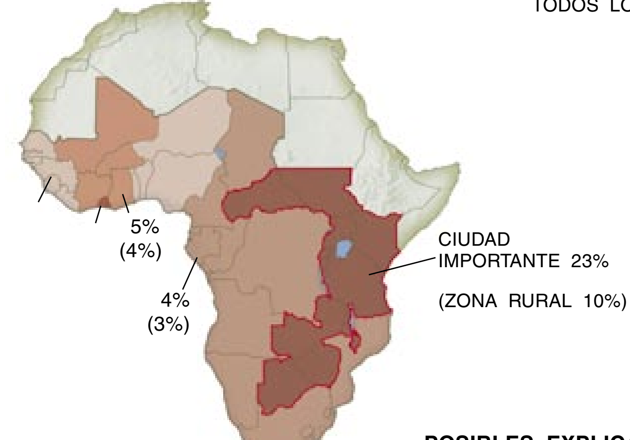
La incidencia del sida en el continente africano no ha sido uniforme. En la franja de países que conforman el cinturón del sida (*mapa de la derecha*), casi el 25 % de la población urbana está infectada por el VIH, el virus causante de ese azote. Sin embargo, en otras regiones el índice de infección es de tan sólo un 1 por ciento (*mapa A*), equiparable a las cifras observadas en países occidentales. En el marco de la investigación de la epidemia desatada en el cinturón del sida, examinamos diversos factores al objeto de acotar qué costumbres eran, a la vez, comunes y exclusivas de la región.

La existencia de índices elevados de enfermedades de transmisión sexual (*mapa B*) suele reflejar que, en esas

EL CINTURON DEL SIDA

PORCENTAJES MAS ELEVADOS DE CASOS DE VIH (MOSTRADO EN TODOS LOS MAPAS)

PORCENTAJE DE POBLACION CON VIH



CINTURON DEL SIDA: REPUBLICA CENTROAFRICANA, SUDAN MERIDIONAL, UGANDA, KENIA, RUANDA, BURUNDI, TANZANIA, ZAMBIA, MALAVI, ZIMBABWE, BOTSWANA

ABIDJAN EN LA COSTA DE MARFIL

MALI, BURKINA FASO, ZONAS DE LA COSTA DE MARFIL, GHANA

CHAD, CAMERUN, GUINEA ECUATORIAL, GABON, CONGO, ZAIRE, ANGOLA, NAMIBIA, SUDAFRICA, SUAZILANDIA, LESOTO, MOZAMBIQUE

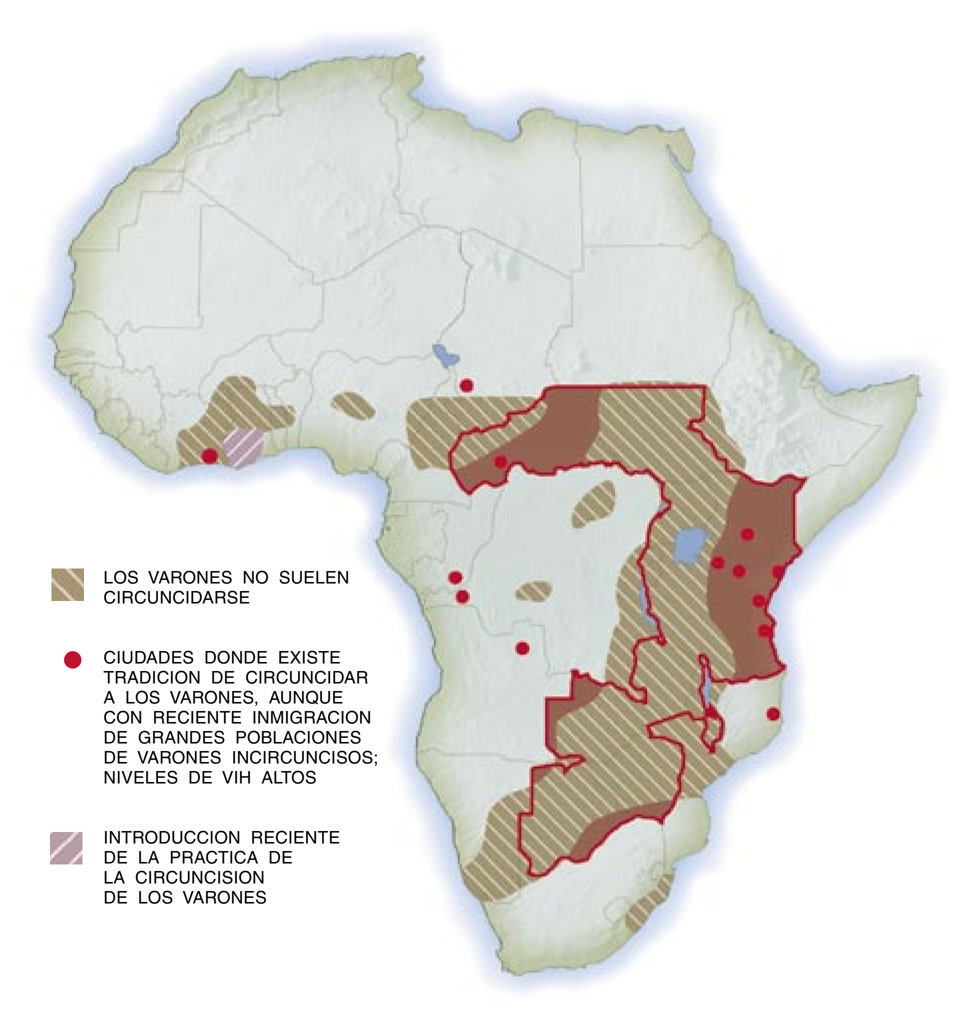
POSIBLES EXPLICACIONES PARA LA EPIDEMIA DEL SIDA

B

NIVELES ELEVADOS DE ESTERILIDAD CAUSADA POR LA EXISTENCIA GENERALIZADA DE ENFERMEDADES DE TRANSMISION SEXUAL

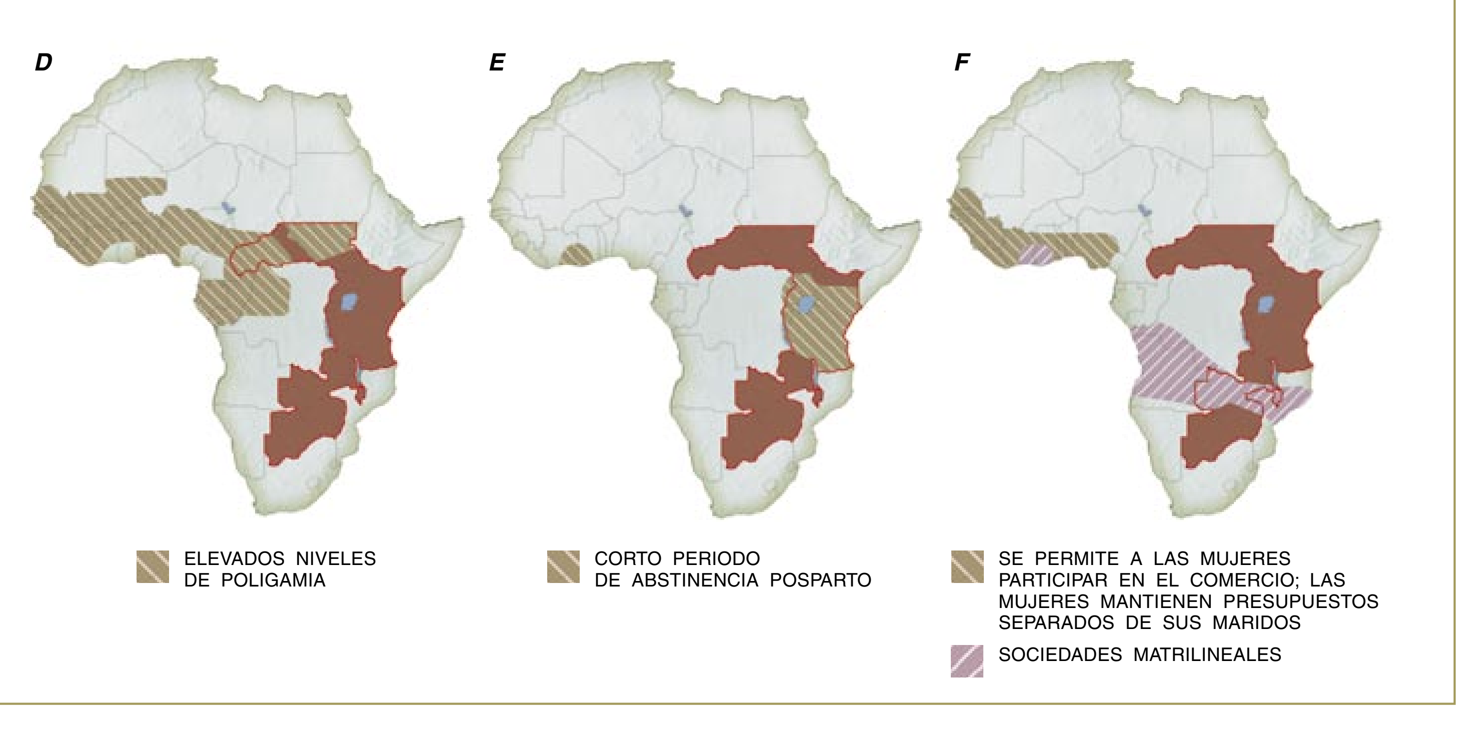
C

MATRIMONIOS A EDAD TARDIA



regiones, el comportamiento sexual es de particular riesgo (cambio frecuente de pareja y relación carnal con prostitutas). Además, las relaciones sexuales prematrimoniales y extraconyugales (que, en general, favorecen más la propagación de esas enfermedades que el sexo dentro del matrimonio) tienden a ser más comunes allí donde la gente retrasa la boda (*mapa C*) o donde los varones se casan con más de una mujer (*mapa D*), lo que obliga a los demás a permanecer solteros durante muchos años. Las relaciones extramatrimoniales pueden ser menos comunes en las regiones donde no se restringe el comportamiento sexual femenino después de la maternidad (*mapa E*). Las sociedades o comunidades matrilineales, que permiten a las mujeres participar libremente en el comercio, fomentan la independencia femenina, lo que, a su vez, puede promover el mantenimiento de relaciones prematrimoniales y extraconyugales (*mapa F*).

La mayoría de las hipótesis que fuimos investigando no justificaban el altísimo índice de infección en el cinturón del sida. Un factor destacaba, sin embargo: la incircuncisión de los varones (*izquierda*). En el área donde no existe la costumbre de circuncidar a los varones, los porcentajes de VIH se cuentan entre los más elevados del cinturón del sida. Además, la emigración de varones incircuncisos de esta zona hacia las ciudades situadas fuera de la región de infección ha elevado la incidencia del sida en medios urbanos.



de Africa las mujeres se aplican astringentes, como el alumbre (utilizado durante mucho tiempo en Occidente para secar la sangre de los cortes del afeitado), tela u hojas para secarse la vagina, conforme a las demandas tradicionales locales de los varones. Recurren también al secado vaginal para eliminar la secreción causada por las infecciones, frecuentes en las regiones tropicales donde la higiene escasea y falta la medicación. Estos métodos de secado pueden arañar o alterar la pared vaginal, haciéndola más sensible a la hemorragia durante el coito y, posiblemente, aumentando la probabilidad de infección por el VIH. No obstante, no hemos encontrado prueba alguna que relacione estas prácticas con un mayor riesgo de contraer el VIH.

El hipotético papel de la circuncisión

¿Qué podría alimentar la epidemia heterosexual? Aunque al principio nuestra investigación parecía hallarse en un callejón sin salida, en 1989 encontramos una nueva pista. Un equipo canadiense-keniata que trabajaba en la facultad de medicina de la Universidad de Nairobi, donde la epidemia hace estragos, había publicado un año antes que los porcentajes de sida eran, entre los nómadas luo de Kenia occidental, más altos que entre los kikuyu de Kenia central. Al principio, supusieron que el grupo étnico luo estaba en situación de mayor riesgo de contraer la enfermedad porque emigraba de un área próxima a Uganda, que se creía el epicentro de la epidemia del VIH.

Pero a medida que la teoría del epicentro fue perdiendo solidez, los investigadores propusieron una explicación alternativa: atribuyeron a la circuncisión el riesgo menor de los kikuyu a contraer la enfermedad, práctica que no se da entre los luo. Según parecía, era más probable que los luo incircuncisos tuvieran chancroide (una enfermedad de transmisión sexual caracterizada por la aparición de úlceras blandas en los genitales) o sífilis. Estos varones presentaban también un riesgo inesperadamente elevado de contraer el VIH: en la capital, Nairobi, la probabilidad de que un hombre luo afectado por el chancroide contrajera el VIH al mantener relaciones sexuales una sola vez con una prostituta positiva para el virus era del 50 por ciento.

Atraído por estos datos, un equipo norteamericano dirigido por John Bongaarts, del Consejo de Población, publicó en 1989 un artículo en el que demostraba una notable correspondencia entre las regiones del Africa subsahariana donde los niveles de infección por el VIH eran elevados entre sus habitantes locales y las áreas en las que no había costumbre de circuncidar a los varones. Al año siguiente, el equipo de Stephen Moses, del grupo canadiense-keniata, completó su propio análisis de la epidemia de sida y llegó a la misma conclusión.

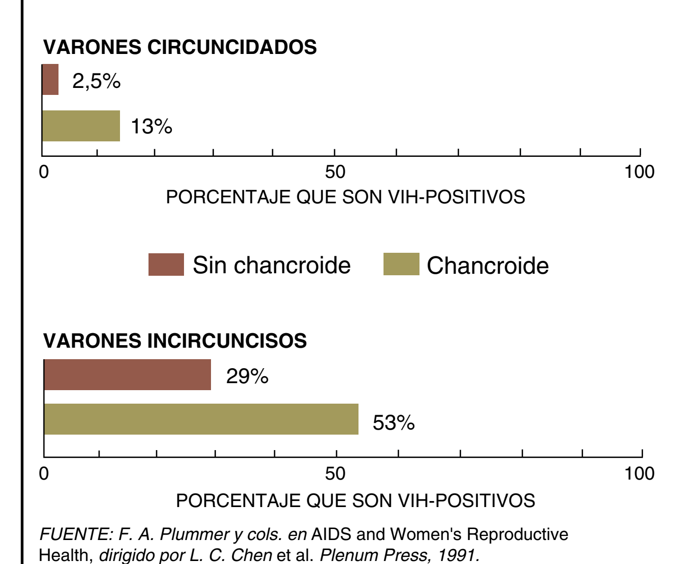
Sorprende la falta de interés con la que se acogió la publicación de estos dos artículos. La Organización Mundial de la Salud (a través de su programa global sobre el sida) destacó que Moses y su equipo no

Circuncisión, chancroide y sida

Hasta ahora nadie ha logrado establecer de manera tajante que la incircuncisión de los varones incrementa la sensibilidad al sida. Las teorías vigentes hacen hincapié en la naturaleza del prepucio y la importancia de la higiene del pene. Ciertas enfermedades de transmisión sexual, en particular el chancroide, que causa grandes úlceras blandas en los genitales, suelen aparecer con mayor frecuencia entre los varones incircuncisos de las zonas pobres, donde resulta difícil mantener el aseo personal. El chancroide desapareció de Occidente a principios de este siglo, y, según parece, conforme la sociedad fue prosperando con la posibilidad consiguiente de atender a la higiene personal.

Los estudios realizados entre los soldados americanos y australianos durante las guerras de Vietnam y de Corea apoyan la conexión entre la incircuncisión, la falta de higiene y los elevados niveles de chancroide. Un estudio realizado por Joseph Asin en 1952 entre los soldados estadounidenses que sirvieron en Corea, daba cuenta de que los hombres eran más sensibles a la infección por el chancroide como consecuencia de una limpieza inadecuada, "en especial el lavado de los genitales con jabón y agua después de la exposición". Para los hombres incircuncisos, la limpieza exhaustiva de los genitales puede ser complicada. Sólo alrededor del 33 por ciento de los soldados norteamericanos que lucharon en Corea no estaban circuncidados, pero el 96 por ciento de los afectados por el chancroide pertenecían a este grupo.

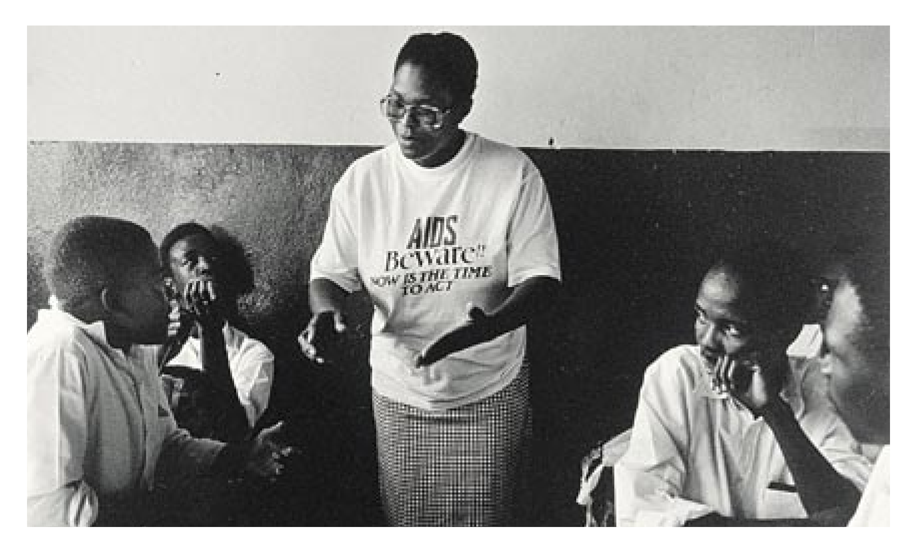
Una investigación reciente llevada a cabo en Kenia ha demostrado que los varones incircuncisos y con chancroide corren mayor riesgo de contraer el VIH [*véase gráficas de la izquierda*]. Sin embargo, estos trabajos no permiten determinar si la incircuncisión aumenta por sí sola la sensibilidad de los hombres al sida o si dicha ausencia promueve la infección por chancroide, que luego cataliza la transmisión del VIH. Nosotros sospechamos que ambos marcos hipotéticos explican los elevados niveles de infección por el VIH en el cinturón del sida. Una vez infectados por el chancroide, los varones se hallan más expuestos a contraer el VIH, porque la presencia de úlceras genitales aumenta la probabilidad de transmisión durante el coito. A diferencia de lo que ocurre con un prepucio sano, el VIH puede penetrar con más facilidad en otro infectado.



FUENTE: F. A. Plummer y cols. en AIDS and Women's Reproductive Health, *dirigido por L. C. Chen* et al. *Plenum Press, 1991.*

podían indicar el mecanismo fisiológico mediante el cual la incircuncisión aumentaba el riesgo de infección por el VIH; su investigación se limitaba a demostrar una correlación estadística entre la circuncisión, el chancroide o la sífilis y la infección por el VIH. Y así, otros investigadores concedieron escaso valor al hallazgo.

En cambio, muchos expertos sobre el sida parecían suponer que las condiciones y el comportamiento africanos eran tan "malos", aunque se ignoraran exactamente cuáles, que la enfermedad acabaría diseminándose sin remisión por todo el continente. Para nosotros, sin embargo, tal explicación debía ser falsa. Confiábamos en poder establecer la causa de semejante asentamiento de la transmisión del VIH en Africa, en particular en el cinturón del sida. ¿Se trataba de la incircuncisión? ¿Debíase a otro motivo? Redoblamos nuestros esfuerzos en el estudio de las culturas subsaharianas, buscando las tradiciones que pudieran explicar la galopante propagación del sida por vía heterosexual.



2. LA PUESTA EN MARCHA DE PROGRAMAS EDUCATIVOS por toda Africa y el mundo puede ayudar a disminuir la mortal propagación del sida. En Hlabisa, Sudáfrica, una voluntaria informa a los alumnos de secundaria sobre los riesgos de mantener relaciones sexuales sin protección.

Investigación en Nigeria

Decidimos comenzar en Nigeria, país situado fuera del cinturón del sida. Habíamos trabajado allí a lo largo de 30 años, estudiando las mismas tradiciones y conducta sexual que, ahora, podrían afectar a la transmisión del sida. Según la opinión establecida sobre las enfermedades de transmisión sexual, la conducta sexual predominante en Nigeria parecía hacer del país un candidato de primera clase para una epidemia heterosexual del sida; allí la mayoría de los varones y muchas mujeres tienen múltiples parejas sexuales. Sin embargo, el porcentaje de personas VIH positivas (0,5 de la población) es el mismo que en Estados Unidos y sólo ligeramente superior al de otros países occidentales. Quizá nuestro trabajo en Nigeria nos ayudara a aislar las condiciones peculiares del cinturón de la enfermedad que contribuyen a la epidemia.

Por razones inherentes a la cultura y la religión tradicionales, y asociadas probablemente a ciertos tipos de práctica agrícola, así como de tenencia y herencia de la tierra, las culturas del Africa subsahariana han puesto siempre mayor énfasis en la fecundidad que en la represión de la sexualidad prematrimonial y extraconyugal. En ocasiones, la infidelidad podía azuzar peleas, ser causa de castigos o, más rara vez, inducir a la disolución del matrimonio, pero nunca se la asimilaba a la noción de pecado ni se la recriminaba como en las sociedades occidentales y asiáticas tradicionales. De tan permisiva actitud se desprendían varias consecuencias: ni se prescindía de las mujeres, ni se las escondía; las niñas tenían tantas posibilidades de sobrevivir como sus hermanos. Pero, a la larga, estas tradiciones y actitudes culturales hicieron a las sociedades propensas al ataque de las enfermedades de transmisión sexual.

Nuestro trabajo en Nigeria demostró que, en la zona meridional del país, la mayoría de los varones con una esposa y más del 25 por ciento de los hombres casados con varias habían mantenido relaciones sexuales extraconyugales durante el año anterior; el 75 por ciento de los varones solteros había cohabitado al menos con dos mujeres en ese intervalo. Además, alrededor del 30 por ciento de las mujeres casadas había tenido acceso carnal al menos con dos hombres en el año anterior, igual que el 50 por ciento de las mujeres solteras. Traducidos en términos del número de parejas a lo largo de toda la vida, no hay diferencia entre estos hallazgos y los resultados de las recientes encuestas sociales llevadas a cabo en EE.UU., Inglaterra y Francia, aunque en estos últimos, una mayor proporción de las relaciones sexuales se mantenían antes del matrimonio. Según parece, aun cuando se está produciendo cierta liberalización de la sexualidad en las sociedades occidentales, la cultura continúa desalentando el sexo fuera del matrimonio, razón por la cual la transmisión heterosexual del VIH, está disminuyendo, en lo que coadyuvan las mejores medidas preventivas.

Las enfermedades de transmisión sexual y el sida se propagan con gran rapidez entre las personas con muchas parejas sexuales y con poco acceso a servicios para combatir la infección y a las medidas preventivas, como los preservativos. No sorprende que la gonorrea y, en cierta medida, la sífilis, resultaran enfermedades comunes en Nigeria; el chancroide, sin embargo, es casi desconocido allí. Por alguna razón, el país no estaba sufriendo el tipo de epidemia de sida desencadenada en otros lugares. Por todo el Africa subsahariana situada fuera del cinturón del sida, hombres y mujeres tienen múltiples parejas sexuales, las enfermedades de transmisión sexual no tratadas están generalizadas y una proporción significativa de varones mantiene relaciones con prostitutas, entre las cuales los niveles de infección por el VIH bastan para desencadenar una epidemia. Pero la enfermedad ha alcanzado un nivel de crisis sólo en el cinturón del sida. ¿Cuál es el factor adicional que caracteriza esta área?

Rechazo de otras opciones

Nosotros y otros exploramos diversas hipótesis. Quizás el sida se propagara a lo largo de rutas donde los niveles de las enfermedades de transmisión sexual son ya insólitamente elevados; enfermedades que tienden a aparecer donde menudean las prácticas sexuales de riesgo, como el sexo con prostitutas o cambio frecuente de pareja. Teníamos una prueba a mano. Inmediatamente al

oeste de Uganda y Ruanda, pero fuera del cinturón del sida, se encuentra el cinturón de mayor esterilidad del mundo. En esta región, una epidemia de enfermedades de transmisión sexual, que ha persistido durante más de un siglo, ha devastado la población, provocando la esterilidad de buena parte de la población. Es significativo, sin embargo, que pese a los niveles conspicuos de ciertas enfermedades de transmisión sexual, pocas personas de esta región padecen chancroide y la prevalencia del sida aquí es, a lo sumo, moderada.

Nos detuvimos luego en la escarificación, práctica que se encuentra muy generalizada por todo Africa. Se cree que las incisiones hechas en extremidades y rostro previenen o curan las enfermedades. En algunas zonas, se han escarificado uno detrás de otro, con los mismos instrumentos, todos los miembros de una familia donde la enfermedad ha aparecido; costumbre que redobla el riesgo de contaminar a una persona con la sangre de otra. Pero esta práctica no es habitual ni exclusiva del cinturón del sida. Por tanto, la escarificación no explicaría la epidemia.

Nos propusimos a continuación identificar qué podría inducir a los hombres a recurrir al sexo (mercenario sobre todo) fuera del matrimonio. Piénsese, por ejemplo, en los varones solteros en las sociedades donde existe la poligamia; pueden tardar años en encontrar mujeres disponibles para casarse. La práctica de la poligamia, sin embargo, es más común fuera del cinturón del sida. También consideramos la edad media del varón en el momento del matrimonio; partíamos de la hipótesis según la cual cuanto más tiempo esté un hombre sin casarse, más tiempo, y con mayor frecuencia, puede haber recurrido al comercio con prostitutas. Pero esta idea tampoco resultó satisfactoria.

Examinamos la duración de la abstinencia femenina después del parto: en algunas regiones, los hombres no tienen acceso carnal a sus mujeres durante un período equivalente al 60 por ciento de su vida conyugal, dadas las tradiciones relativas al parto y las relaciones sexuales. Ahora bien, en ciertas regiones del cinturón del sida la abstinencia posparto es bastante breve en comparación con la practicada en otros lugares de Africa, lo que reduce el tiempo en que los maridos sólo pueden recurrir al sexo extraconyugal y, por consiguiente, arriesgado.

Sometimos a contrastación muchas hipótesis más. Por ejemplo, la tradición de los jóvenes que participan en sociedades guerreras, reacias a los embarazos prematrimoniales, podría fomentar las visitas a las prostitutas, cuyos embarazos accidentales tendrían poco efecto en los varones implicados. La costumbre de exigir grandes dotes a la familia del novio hace que los padres se preocupen más por la ruptura del acuerdo matrimonial si la novia queda embarazada antes del matrimonio; esta preocupación también podría inducir a los varones a visitar prostitutas antes del matrimonio. La autonomía femenina, que se encuentra en las sociedades matrilineales o que queda reflejada por la participación de las mujeres en el comercio y los negocios, podría favorecer la independencia sexual de éstas respecto de sus maridos, lo que, con mucha posibilidad, se traduce en el establecimiento de relaciones sexuales extraconyugales arriesgadas por parte de maridos y mujeres. Las poblaciones donde abundan más los varones que las mujeres (más frecuentes en las zonas urbanas, como consecuencia de la inmigración) podrían promover también la prostitución. Pero ninguna de estas situaciones eran habituales o exclusivas del cinturón del sida. Seguíamos sin aislar el factor inductor de la rápida transmisión heterosexual del VIH.

De vuelta a la circuncisión

Desalentados, retomamos de nuevo la investigación inicial que sugería una conexión entre la incircuncisión masculina y la propagación del sida. Actualizamos nuestros mapas con datos recientes sobre los niveles de infección por el VIH y observamos una correspondencia casi exacta entre las zonas de Africa con elevado número de varones incircuncisos y las regiones azotadas por la grave epidemia de sida. Sin embargo, otros investigadores aseguraban que la fuente original de los datos de circuncisión estaba anticuada (fue publicada por primera vez por George P. Murdock, de la Universidad de Pittsburgh, en *Ethnographic Atlas*, en 1967) o que el análisis de la relación propuesta era imperfecto, por lo que rechazaron esos informes. Y había quienes creían que los hallazgos eran mera coincidencia. Para complicar aún más el debate estaba la controversia entablada en Occidente entre la profesión médica sobre si la circuncisión era una mutilación sin sentido; muchos no deseaban reavivar esa discusión. Además, algunos funcionarios de sanidad temían el aumento de las hostilidades étnicas, en vez de una mejora de las estrategias de prevención del sida, si se vinculaba el estar o no circuncidado, la sensibilidad al sida y las cuestiones raciales.

Durante los tres últimos años, sin embargo, hemos vuelto a examinar la metodología, así como las fuentes antropológicas, empleadas en los artículos y hemos llegado al convencimiento de la solidez de tales hallazgos. Además, en investigaciones continuadas hemos encontrado muy poco apoyo a la acusación de irrelevancia de los datos. La vinculación de la incircuncisión con los niveles altos de infección por el VIH se manifiesta en todo su vigor. En algunas partes del cinturón del sida, casi ningún varón está circuncidado, una situación inverosímil en el contexto africano. Fuera del cinturón del sida, en la ciudad de Abidján, capital de Costa de Marfil, los niveles de infección por el VIH son tan elevados como en algunas ciudades del cinturón del sida; creemos muy probable que la epidemia de Abidján se alimente de los inmigrantes provenientes de un área circundante donde la mayoría de los varones está sin circuncidar.

Así pues, llegamos a la conclusión de que la transmisión desenfrenada del VIH en el cinturón del sida se debe a la ausencia del hábito de la circuncisión masculina, combinada con una conducta sexual arriesgada (múltiples parejas sexuales, relaciones sexuales con prostitutas y chancroide no tratado). Las prácticas sexuales inseguras han contribuido, desde luego, a la propagación del sida por todo Africa y, de hecho, por todo el mundo. Pero una conducta de riesgo no basta, por sí sola, para desatar la epidemia observada en el cinturón del sida.

Hay que ser precabidos en lo que respecta a la conexión entre la circuncisión masculina y el sida. En principio, la incircuncisión parece reforzar los peligros derivados de las prácticas sexuales inseguras. Los varones asiáticos, por ejemplo, no suelen estar circuncidados, pero la región no ha visto el número de casos de sida que ha padecido Africa, probablemente por los diferentes hábitos sexuales; la circuncisión no constituye, pues, una protección absoluta contra el sida: los hombres circuncidados siguen estando en situación de riesgo. En cualquier lugar del Africa subsahariana, incluso donde todos los varones están circuncidados, los niveles de infección por el VIH son elevados entre las prostitutas y sus clientes. La epidemia en este grupo serviría, en potencia, como punto de partida para que el virus avanzara en otras comunidades.

Combatir el sida mundialmente

Dado que el virus progresa a un ritmo muy distinto por los diferentes segmentos de la población, las mayores probabilidades de combatir el sida en cualquier lugar se consiguen dirigiendo programas educativos y preventivos para grupos de alto riesgo (homosexuales, prostitutas y sus clientes, drogadictos y hombres y mujeres promiscuos). En el Africa subsahariana, la circuncisión podría ofrecerse como un refuerzo de otras medidas protectoras.

La generalización de la circuncisión masculina, que habría de enfrentarse con un más que probable rechazo, reduciría, sin embargo, el nivel de infección en el cinturón del sida a los niveles, muy inferiores, observados en el resto del Africa subsahariana. Con todo, la erradicación de la enfermedad requerirá un asalto múltiple. Por un lado, hay que alentar a las personas a restringir el número de parejas sexuales y a practicar un sexo más seguro. Un mejor tratamiento de las enfermedades de transmisión sexual, en particular el chancroide, resulta también crucial.

Hay signos de cambio en el este africano. El número promedio de parejas sexuales parece estar disminuyendo. En Uganda, por ejemplo, las mujeres ofrecen alternativas al sexo vaginal o se niegan a tener relaciones sexuales inseguras. Y se acepta mucho más el uso del preservativo. Sin duda como consecuencia de todo ello, la propagación de la enfermedad parece entrar en una curva de descenso en Uganda.

En el sudoeste rural de Tanzania, y por supuesto en algunos otros lugares del cinturón del sida, los varones incircuncisos no han esperado a que los investigadores lleguen a un acuerdo sobre la vinculación entre circuncisión y sida. Observando su comunidad y las vecinas, han llegado a la conclusión de que corren mayor peligro de adquirir el sida que los hombres circuncidados. Crece el número de los que se presentan en los hospitales solicitando la circuncisión para sí y, a menudo, para sus hijos. Las clínicas que ofrecen la circuncisión masculina de adultos como una medida de protección se anuncian en los periódicos de Tanzania.

Por fortuna, las rivalidades étnicas no parecen haber empeorado como consecuencia de esta cuestión. Si las autoridades sanitarias establecen por fin que la incircuncisión aumenta la propensión de los varones a la infección por el VIH, parece probable que se solicite esa intervención. Ahora bien, al mismo tiempo los expertos tendrán que dejar bien claro que la circuncisión no es en sí misma una protección contra el sida. Aunque la epidemia del Africa subsahariana podría frenar su ritmo de expansión con la difusión de preservativos y, probablemente, con la práctica de la circuncisión, los habitantes del cinturón del sida seguirán estando en una situación de grave riesgo de infección por el VIH.

La epidemia subsahariana proporciona una importante lección a los programas mundiales contra el sida. Dado que, para mantener una epidemia heterosexual que afecte a toda la sociedad, deben combinarse un número poco usual de condiciones, parece improbable que en Occidente se produzca una propagación significativa del sida más allá de los grupos de alto riesgo, esto es, los varones homosexuales y los drogodependientes por vía intravenosa. Por consiguiente, los programas preventivos (en particular los puestos en marcha en Asia, donde la epidemia quizás empeore) deberían dirigirse de una manera específica a las personas cuya probabilidad de contraer el VIH es mayor. Estos esfuerzos deben reducir la epidemia ahora en curso en Africa e impedir que se desarrollen condiciones similares en cualquier otro lugar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE RELATIONSHIP BETWEEN MALE CIRCUMCISION AND HIV INFECTION IN AFRICAN POPULATIONS. John Bongaarts, Priscilla Reining, Peter Way y Francis Conant en *AIDS*, vol. 3, n.º 6, páginas 373-377; 1989.

GEOGRAPHICAL PATTERNS OF MALE CIRCUMCISION PRACTICES IN AFRICA: ASSOCIATION WITH HIV SEROPREVALENCE. Stephen Moses, Janet E. Bradley, Nico J. D. Nagelkerke, Allan R. Ronald, J. O. Ndinya-Achola y Francis A. Plummer en *International Journal of Epidemiology*, vol. 19, n.º 3, páginas 693-697; septiembre 1990.

SEXUAL NETWORKING AND AIDS IN SUB-SAHARAN AFRICA: BEHAVIOURAL RESEARCH AND THE SOCIAL CONTEXT. Dirigido por I. O. Orubuloye, John C. Caldwell, Pat Caldwell y Gigi Santow. Australian National University, 1994.

FORUM: THE EAST AFRICAN AIDS EPIDEMIC AND THE ABSENCE OF MALE CIRCUMCISION: WHAT IS THE LINK? En *Health Transition Review,* volumen 5, n.º 1, págs. 97-117; abril 1995.

Ciencia y sociedad

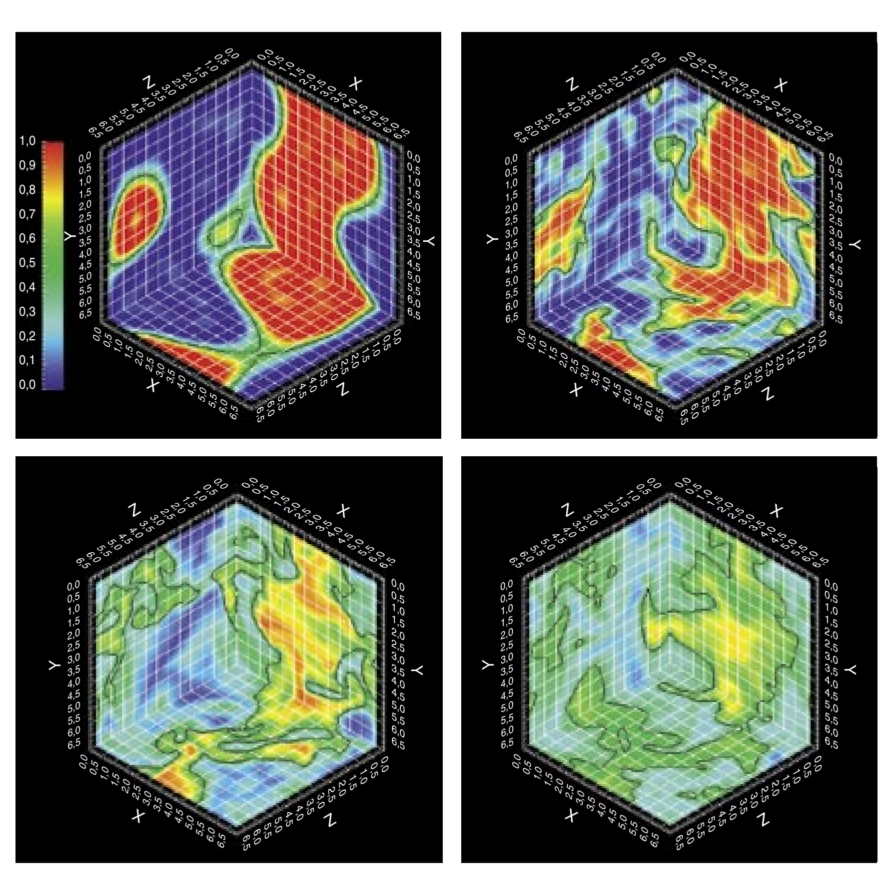
Difusión

y turbulencia

El camarero que prepara con profesionalidad un "cubalibre", tras verter el ron y la cola sobre el hielo del vaso, remata su obra dando unas vueltas vigorosas con la cuchara larga. Si preguntamos a cualquier persona en el bar por qué agita el camarero el combinado, la respuesta más común será "para mezclar bien". ¿Qué es "mezclar"? En una aproximación intuitiva, se trata de homogeneizar las propiedades de una agrupación de sustancias diferentes, de tal modo que no se distingan unas zonas de otras dentro del combinado. Muchos procesos técnicos requieren de esa homogeneización para ser eficientes, por lo que en ellos deseamos que la mezcla tenga lugar rápidamente.

Para entender por qué la agitación favorece la homogeneización, hay que comprender los mecanismos físicos que harán del combinado de varias sustancias una mezcla uniforme. El responsable es la difusión molecular: la agitación térmica de las moléculas provoca que éstas se muevan al azar, fluctuando el valor de su posición con el tiempo y haciendo que la sustancia tienda a ocupar todo el espacio accesible. Así, incluso en reposo, las moléculas de las distintas sustancias que se hallaban en un comienzo segregadas tienden a entremezclarse.

Centrémonos, por mor de sencillez, en el caso de un fluido compuesto por dos componentes distintos. A igualdad de configuración geométrica, la rapidez con que sucede la difusión molecular entre dos sustancias viene indicada por su coeficiente de difusión binario. Su valor es en general bastante pequeño, por lo que este proceso resulta, por lo común, ineficiente para mezclar por sí mismo a gran escala. En el ejemplo del cubalibre, dependiendo de las condiciones iniciales, una mezcla aceptable al paladar podría llevar varias horas.



*La figura muestra la evolución de la mezcla molecular de dos sustancias, "roja" y "azul", bajo la acción de un campo turbulento estadísticamente homogéneo para cuatro tiempos equiespaciados. Se representan las isoconcentraciones del fluido que corta las caras del dominio periódico (un cubo). Aunque el número de Reynolds no es muy alto (la entrefase se ensancha), se puede observar la deformación de la superficie de contacto (*en negro*). (Cortesía de Angel Benedí y Bruno Crespo.)*

El mecanismo más eficaz para aumentar el efecto de la difusión molecular es incrementar la superficie que separa los dos componentes. Ahora bien, en la superficie de separación se desarrolla el intercambio de moléculas; por consiguiente, lo mejor es deformar la superficie, de tal manera que su relación frente al volumen total aumente. Además al estirar la superficie, la zona "gris", donde hay una concentración significativa de moléculas de las dos especies a la vez, se estrecha, lo que también favorece la difusión molecular. Esto es lo que hace la cuchara larga al arrastrar el fluido: genera un campo de velocidades no uniforme en el combinado que incrementa la superficie de contacto y la estira.

Todos los fenómenos ligados al intercambio de propiedades microscópicas a través de superficies de separación se incrementan de forma análoga. Así se uniformiza la temperatura de la sopa, se disuelve el azúcar en el café o el hielo del vaso enfría el cubalibre más rápidamente (en el caso de sólidos, se puede desprender la zona gris de su superficie, lo que también favorece la mezcla). Especial interés reviste la posibilidad de incrementar la reacción química entre dos fluidos inicialmente segregados mediante este mecanismo. Se recuerda que la reacción tiene lugar en esa zona gris donde las moléculas de los dos reactivos entran en contacto.

Se pueden asociar longitudes características a la convección, que es como se conoce el transporte debido al campo de velocidades. Son distancias típicas a lo largo de las cuales la velocidad sufre un cambio significativo en su módulo. Para que la convección constituya una ayuda eficiente para incrementar la mezcla

molecular, es preciso que tenga asociada alguna longitud característica menor que la de la superficie. Si se mueve la superficie como un todo, no se altera el proceso de homogeneización: si nos limitamos a subir o bajar el vaso con el ron y la cola no favoreceremos la mezcla entre ambas sustancias (aparte del efecto debido a la variación de velocidad inducida por las paredes del recipiente, efecto utilizado en las cocteleras). La convección será tanto más eficiente cuanto mayor sea el rango de sus longitudes características menores que el tamaño mayor asociado a la superficie de separación. La superficie de contacto crece porque las escalas convectivas intermedias la pliegan y las más pequeñas la arrugan.

Todos hemos observado el cambio en la naturaleza del movimiento del agua que sale por la cañería al ir abriendo progresivamente el grifo. De caer con una frontera bien delimitada y con una velocidad estacionaria se pasa a un descenso agitado y caótico, con notables fluctuaciones temporales y espaciales de la velocidad. Al aumentar la velocidad de salida, el movimiento determinista laminar se ha transformado en el caótico turbulento. La turbulencia es probablemente el fenómeno de la física clásica más complicado que queda por resolver. No sólo tiene interés como desafío científico, sino también práctico: la mayoría de los movimientos de fluidos que aparecen en la naturaleza y en los procesos industriales son turbulentos.

La turbulencia aparece al dominar en las ecuaciones de transporte del fluido los términos convectivos (que son no lineales) sobre los viscosos (los que hacen que el fluido abandonado a sí mismo se pare). El cociente entre valores característicos de ambos define una cantidad adimensional, el número de Reynolds. Dependiendo de la configuración geométrica, a partir de cierto valor del número de Reynolds el flujo se vuelve inestable y, si continúa aumentando, se llega a un valor que hace que el movimiento se torne caótico: repitiendo un experimento en condiciones que se dirían idénticas se obtienen valores de la velocidad diferentes en el tiempo y en el espacio.

Nota distintiva del movimiento turbulento, relacionada con su naturaleza caótica, es el amplio rango de longitudes características de convección que surge. Al principio, el fenómeno que causa el movimiento establece la escala mayor, por ejemplo, la longitud de las palas de un ventilador. Sucesivamente se establecen movimientos de escala decreciente hasta que se alcanza la longitud de Kolmogorov. Las diferencias de velocidad en esta longitud tan pequeña pueden ser efectivamente anuladas por la viscosidad del fluido. El cociente entre la escala más grande y la más pequeña de convección puede superar seis, nueve y más órdenes de magnitud, aumentando al subir el número de Reynolds. De paso se hace notar que esto hace que la resolución numérica del movimiento turbulento a altos números de Reynolds sea tarea imposible con los ordenadores actuales y con los esperables en un futuro a medio plazo.

El efecto del movimiento turbulento, con una fuerte convección en un amplísimo rango de longitudes características, sobre la superficie de contacto entre las dos sustancias que se mezclan es muy intenso. La superficie se estira, se pliega, se arruga, se deforma enormemente, a la vez que se estrecha la zona gris de separación. Esto provoca una considerable difusión en esas zonas que a su vez tiende a ensancharlas, estableciéndose una especie de equilibrio durante el tiempo en que persisten zonas segregadas de tamaño significativo. Posteriormente, la difusión termina por imponerse, las zonas grises dominan y llega un momento en que no se puede hablar de superficie de separación. Por fin se alcanza la mezcla íntima de las dos especies. El espectacular efecto de la convección turbulenta sobre la superficie de contacto se puede percibir muy bien en el caso de sustancias poco miscibles (coeficiente de difusión muy pequeño), donde se pueden llegar a observar entrefases muy deformadas.

A la vista de lo explicado no es sorprendente que los procesos de mezcla turbulenta sean mecanismos de homogeneización eficaces. Gracias a ello los radiadores calientan rápidamente las habitaciones (la diferencia de densidades entre aire frío y caliente por la acción de la gravedad genera la convección turbulenta) o las centrales térmicas de gas natural queman eficazmente. Aunque la convección generada por la cuchara larga no suela ser tan intensa como para hacer del "cubata" un flujo turbulento.

LUIS VALIÑO
Laboratorio de Investigación
en Tecnologías de la Combustión
CSIC-Diputación General de Aragón

Vacas locas

¿Qué se sabe? ¿Qué se ignora?

La declaración realizada en el mes de marzo por el gobierno británico sobre la posible conexión de la encefalopatía espongiforme bovina (EEB) con la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob (ECJ) se basó en el informe relativo a diez casos de individuos que padecían una variante, hasta entonces desconocida, de enfermedad de Creutzfeldt-Jakob.

Todos los sujetos afectados mostraron los primeros síntomas a lo largo de los dos últimos años. Su edad media estaba comprendida entre los 26 y los 27 años, con dos casos de adolescentes próximos a los 20 y uno de 42 años. De la decena identificada, sólo dos pacientes siguen con vida.

La nueva variedad parece ser una variante clinicopatológica de la forma habitual de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, con una patología atípica más relacionada con el kuru humano que con la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob esporádica o la yatrogénica. También la sintomatología denuncia su afinidad con el kuru, con más ataxia que demencia, rasgo éste más propio de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob yatrogénica que de la esporádica.

Se desconoce si la nueva variante de enfermedad de Creutzfeldt-Jakob constituye en verdad una encefalopatía espongiforme bovina. Pero el hecho de no haberse observado hasta ahora su patología, ni en el Reino Unido ni en ninguna otra parte, así como el inusual grupo de edad —sólo en contadas ocasiones la ECJ aparece en individuos menores de 30 años—, han determinado que el Comité Consultivo para la Encefalopatía Espongiforme (SEAC) llegara a la conclusión de que nos hallamos ante un nuevo factor de riesgo.

De acuerdo con el SEAC, el mejor candidato para este nuevo factor de riesgo sería la posible exposición al agente de la encefalopatía espongiforme bovina antes de la entrada en vigor de la prohibición sobre los despojos, en 1989. Mas, para establecer que se trata realmente de la encefalopatía espongiforme bovina, habrá que realizar más experimentos.

Persisten, en efecto, muchísimas dudas sobre la naturaleza de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, la encefalopatía espongiforme bovina y, en general, sobre las enfermedades causadas por priones. Se desconoce, por ejemplo, la naturaleza exacta del

agente infeccioso. Considerado antaño un virus, dada su elevada resistencia a la radiación ionizante y ultravioleta —sólo los solventes y las temperaturas elevadas pueden reducir su capacidad infectiva— se propuso, ya hace 29 años, que el agente carecía de ácidos nucleicos.

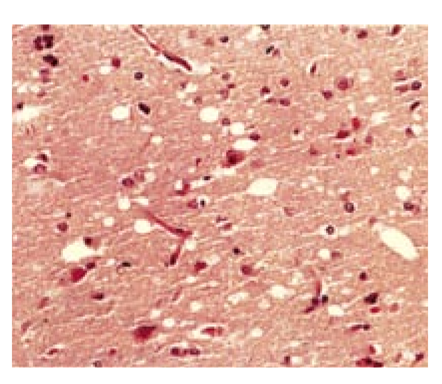
La "hipótesis del prion", a saber, que el agente infeccioso era una conformación aberrante de una proteína natural y que transformaba una proteína priónica inocua en una forma nociva y resistente a la acción de las proteasas, goza ya de amplia aceptación.

Para que se produzca la infección debe darse en el huésped la proteína priónica, cuya función habitual se ignora. [Dos informaciones recentísimas de *Nature* le atribuyen un papel en las neuronas de Purkinje y en la regulación del sueño. N. de la R.] Ello significa que no se pueden infectar ratones, que carecen de la proteína priónica normal, por cuanto no puede sintetizarse ninguna forma anómala adicional. Sí se ha conseguido en sistemas acelulares propagar la proteína priónica aberrante resistente a proteasas; más aún: pueden reproducirse *in vitro* las propiedades de la "cepa" en cuestión.

Pero la historia no acaba aquí. Sabemos que existe una predisposición o sensibilidad genética a las enfermedades priónicas. Se ha sugerido, asimismo, que otras células podrían estar también implicadas en los efectos neurotóxicos de la forma aberrante.

Además, en los casos de EEB no se acaba de conocer del todo el proceso en virtud del cual la partícula priónica llega al cerebro desde el tracto digestivo. Se ha propuesto que atraviesa el intestino y, por el sistema linfático, alcanza el bazo; los nervios de este órgano la portarían a la médula espinal y el cerebro. También se ha sugerido una posible implicación del sistema inmunitario, dada la participación de la microglía en la neurotoxicidad.

Deben despejarse dos interrogantes principales: ¿puede la EEB afectar a las personas que han consumido vacuno infectado? y ¿se deben a la encefalopatía espongiforme bovina los 10 casos mencionados de enfermedad de Creutzfeldt-Jakob? Un experimento, seguramente ya en marcha, habrá de resolver si los pacientes de ECJ deben su mal a la encefalopatía espongiforme bovina. El experimento de marras consiste en inocular en ratones material infeccioso procedente de pacientes afectos de enfermedad de Creutzfeldt-Jakob; tal inoculación permitiría descubrir si la patología clínica resultante remeda la perfectamente descrita ya para la EEB en ratones.



Puntos conflictivos: sección de cerebro en la que se ponen de manifiesto las lesiones blancas de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob

El gobierno británico se ha comprometido a invertir más dinero en la investigación de priones. Pero, ¿cómo distribuir las partidas? Debe proseguir la investigación en torno a la naturaleza exacta del agente infeccioso; si la proteína del prurito lumbar producida en los sistemas libres de células demostrara su carácter infectivo en ratones, la hipótesis que entiende el prion como "mera proteína" recibiría un sólido respaldo. Habría que dedicar mayor empeño en precisar la vía infecciosa, desde la exposición hasta el inicio de la enfermedad, y en identificar los factores genéticos de la sensibilidad.

En una vertiente más aplicada, tendrían que desarrollarse pruebas de diagnóstico precoz lo mismo en humanos que en ganado. Los enfoques terapéuticos constituyen también un objetivo importante; aunque los fármacos antifúngicos y los polianiones en dosis elevadas inhiben la transmisión en ratones, presentan efectos colaterales indeseables y no ha resultado satisfactoria la terapia fundada en tales drogas para remediar la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob en humanos.

Hay que desarrollar mejores métodos para detectar las partículas priónicas infecciosas. Los sistemas disponibles en la actualidad, la hibridación Western ("Western blotting") o el bioensayo, basados en la inoculación en ratones, carecen de la finura necesaria; la "barrera de especie" entre el vacuno y los ratones requiere inyectar en un ratón una dosis de agente de encefalopatía espongiforme bovina equivalente a 10.000 veces más que la exigida en vacas para reproducir la enfermedad.

Los ratones transgénicos que expresaran la proteína priónica bovina podrían proporcionar un ensayo más sensible para la encefalopatía espongiforme bovina en tejidos potencialmente infectados. Por no hablar de lo bien recibidos que serían los métodos bioquímicos y otros de detección directa.

No se puede todavía establecer con rotundidad que la encefalopatía espongiforme bovina sea la culpable de la decena de pacientes que han contraído la forma aberrante de ECJ. Ni puede predecirse, por tanto, el número potencial de brotes que aparecerán en el futuro. Con todo, el SEAC sigue convencido de que las medidas llevadas a cabo durante los últimos 7 años implican que la carne es ahora más digna de confianza que nunca.

KIMBERLY CARR
(Tomado de *Nature*)

Biología marina

La vida planctónica de los pulpos

Existen algo más de 200 especies de pulpos. En más de la mitad de ellas, los animales recién nacidos son de talla muy pequeña, de tres a cinco milímetros, y viven formando parte del plancton. Hasta hace poco, sin embargo, apenas si se conocían la biología, el comportamiento y la duración de esta fase planctónica.

En efecto, en un estudio reciente llevado a cabo por los autores se ha abordado ese período inicial del ciclo de vida, desde el nacimiento hasta el asentamiento en el fondo, bajo condiciones de laboratorio. La investigación se ha realizado con la especie típica mediterránea: el pulpo común o pulpo de roca (*Octopus vulgaris*), especie distribuida también en el Atlántico nordoriental.

La hembra de *Octopus vulgaris* pone una única masa de huevos, arracimados, cuyo número oscila entre 100.000 y 500.000. En el mar, suele depositar los racimos en el interior de alguna cavidad rocosa litoral, donde se desarrolla el período embrionario, que abarca de uno a tres meses, según la temperatura. Durante este período, la hembra protege y ventila la masa de huevos, falleciendo tras la eclosión de los recién nacidos. Esto mismo sucede en condiciones de laboratorio.

Al nacer, las crías son minúsculas, miden tres milímetros de longitud total, pesan 1,4 miligramos y ya tienen tres ventosas en cada uno de sus ocho brazos. Cultivados a temperaturas cálidas (21 grados C), su crecimiento es de tipo exponencial e incrementan su peso entre 5,5 y 11,5 % cada día. Así, doblan su propio peso cada 8,5 días, en promedio. Transcurridos entre 47 y 54 días del nacimiento, los pequeños pulpos ya miden cerca de dos centímetros, y es entonces cuando descienden al fondo marino, donde vivirán el resto de su vida.

Durante la fase planctónica, su medio de locomoción es el de natación continua por propulsión a chorro. Su comportamiento natatorio se ha estudiado a partir de la digitalización de registros de vídeo obtenidos en tanques de experimentación. Las contracciones rítmicas del manto expulsan el agua a través del sifón (músculo tubular situado debajo de la cabeza). Aunque pueden desplazarse en cualquier dirección mediante el movimiento del sifón, lo hacen hacia atrás durante el 99 % del tiempo. Su natación en velocidad de crucero es entre dos y seis centímetros por segundo, y alcanzan máximos de 45 centímetros por segundo como velocidad punta.

Durante este período planctónico los pequeños pulpos se alimentan de larvas de crustáceos. Se comportan como activos predadores visuales. El desplazamiento hacia delante, girando el sifón 180 grados, lo utilizan principalmente para la captura de presas, a las que dan caza a una velocidad de hasta 15 centímetros por segundo. Durante la captura y manipulación de la presa extienden sus brazos, lo que les permite sujetar organismos de su misma talla e ingerir grandes cantidades de alimento.

También se ha observado la forma en que la presencia de presas en el medio modifica el comportamiento natatorio de los pequeños pulpos. Las trayectorias recorridas por los pulpos tienden a ser curvilíneas y de baja velocidad en presencia de presas; en su ausencia, las trayectorias son más rectilíneas y de velocidad superior. Trasladado a su medio natural, este comportamiento del pulpo puede representar una estrategia de alimentación para explotar las manchas de zooplancton, donde halla su alimento. Así, las trayectorias curvilíneas y de baja velocidad incrementan el tiempo de residencia en una mancha y la probabilidad de encuentros con posibles presas. De forma complementaria, se acorta la residencia en zonas de baja densidad de alimento al incrementar la celeridad mediante desplazamientos rectilíneos, entre mancha y mancha.



Ejemplar adulto de Octopus vulgaris. *(Foto: R. Villanueva)*

En las características natatorias de estos animales influyen también su propio crecimiento y desarrollo. Durante el segundo mes de vida planctónica, atraviesa notables cambios morfométricos. El más llamativo se observa en los brazos, que crecen desproporcionadamente en relación al resto del cuerpo. Dejando atrás sus proporciones corporales iniciales, más próximas a las de un calamar e hidrodinámicamente mejor adaptadas a la natación, los animales adoptan ya la forma típica de un pulpo. Este crecimiento corporal desigual y el incremento en peso de la corona braquial no permiten limitarse a la natación por propulsión a chorro como único medio de locomoción. A los dos meses de edad, cuando descienden al fondo, su comportamiento juvenil es similar al de los ejemplares subadultos y adultos. Aunque pueden nadar de forma ocasional, habitualmente se desplazan por el fondo usando los brazos.

En el Mediterráneo, la época de puesta de *Octopus vulgaris* puede abarcar todo el año, pero se concentra durante los meses de mayo y junio. En la masa de huevos, el desarrollo de los embriones se acelera con las cálidas temperaturas del agua en verano, siendo ésta la principal época de nacimientos. El asentamiento de los pequeños pulpos sobre el fondo suele producirse durante los meses de septiembre y octubre. Estos ejemplares juveniles que, al descender al fondo, pesan alrededor de 0,2 gramos, siguen creciendo de forma exponencial hasta alcanzar la madurez sexual durante el verano siguiente, cuando temina su ciclo de vida.

El conocimiento de los caracteres biológicos del período planctónico y en qué manera influyen sobre éste las variables ambientales revisten sumo interés para determinar el reclutamiento de esta especie de importancia pesquera. *Octopus vulgaris* es una especie de crecimiento rápido, cuyo breve ciclo de vida oscila entre 12 y 18 meses. Ello significa que el período planctónico representa entre el 10 y el 15 % de su ciclo vital. Esta proporción es superior al de la mayoría de las especies de peces con fases larvarias planctónicas. La elevada fecundidad que caracteriza a esta especie y la capacidad natatoria de los pulpos durante su vida planctónica, confieren a estos cefalópodos, típicamente bentónicos, una capacidad de dispersión y colonización considerables.

Los investigadores se han venido aplicando desde hace tiempo al estudio de *Octopus vulgaris*. Estudio que se ve facilitado por la fácil adaptación de las fases subadultas y adultas a las condiciones de cautividad en acuario. Resultado de ello es que hoy conocemos bastante bien la fisiología, el crecimiento y el comportamiento de subadultos y adultos. El conocimiento de los requerimientos de cultivo de la fase planctónica permite en la actualidad cerrar el ciclo vital de esta especie bajo condiciones de cultivo. Los interesantes caracteres que la distinguen —rápido crecimiento, altas tasas de

conversión del alimento (40-60 por ciento), rico contenido en proteínas (70-90 por ciento del peso seco) y elevada fecundidad— los presentan como un nuevo recurso a explotar en acuicultura marina.

ROGER VILLANUEVA
Instituto de Ciencias del Mar, Barcelona
CHRISTIAN NOZAIS
Y SIGURD V. BOLETZKY
Observatorio Oceanológico de Banyuls

El lince ibérico

Progenie molecular

Los linces son félidos. Pertenecen, pues, a la misma familia que el león, el tigre, el leopardo y el jaguar, aunque éstos se engloban bajo un género distinto, *Panthera*. Los linces presentan un tamaño mediano (de 9-18 kilogramos), una cola corta (12-20 centímetros) y unos "pinceles" característicos (mechones de pelos, de unos 5 centímetros de longitud), que rematan sus orejas. Se extienden por amplias zonas de Europa, Asia y Norteamérica.

Se han reconocido cuatro especies entre los linces actuales. Dos en la región neártica: el lince rojo americano o bobcat (*Lynx rufus*) y el lince canadiense (*L. canadensis*); y otras dos en la región paleártica: el lince boreal o euroasiático (*L. lynx*) y el lince ibérico (*L. pardinus*).

Pero no es una clasificación aceptada por todos. Como tampoco hay unanimidad en torno a las relaciones filogenéticas entre esas especies, y en particular sobre el estato taxonómico del lince ibérico. Se ha sugerido, por ejemplo, que, a tenor de determinados rasgos morfológicos, el género *Lynx* tendría un carácter polifilético; es decir, las especies componentes podrían haber evolucionado por vías diferentes.

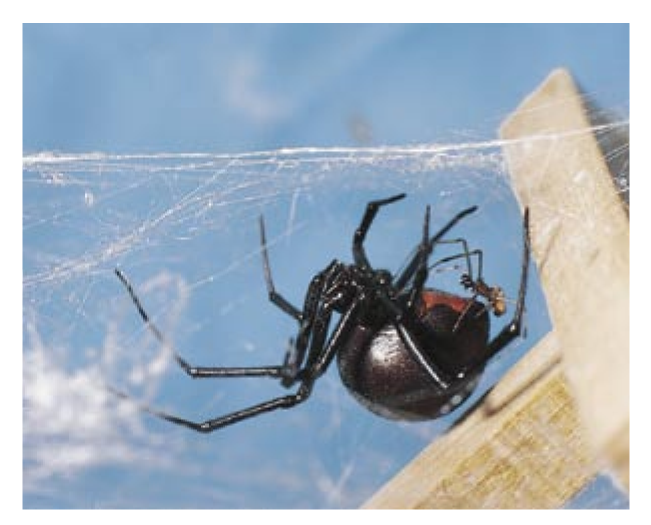
De la falta de un conocimiento claro de la filogenia y taxonomía de los linces se ha venido resintiendo en particular la biología de la conservación del lince ibérico, considerado el félido más vulnerable del mundo por el Grupo de Especialistas de Félidos de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Esta especie amenazada, para algunos una subespecie del lince boreal, consta de sólo un millar de individuos, más del 95 por ciento de los cuales vive en España. Se agrupan en poblaciones pequeñas, altamente fragmentadas y aisladas.

Decidimos investigar la situación taxonómica y relaciones filogenéticas del lince ibérico aprovechando los progresos registrados en los últimos años por las técnicas de la sistemática molecular. En nuestro análisis incluimos, además de las cuatro especies mencionadas, otras próximas: caracal (*Caracal caracal*), serval (*Leptailurus serval*), jaguarondi (*Herpailurus yagouaroundi*) y ocelote (*Leopardus pardalis*). Abordamos la

---

Entrega absoluta

Que las arañas hembra de la especie *Latrodectus mactans* no dudan en comerse al macho tras la cópula se ha sabido desde los años treinta. Por eso se las llama viudas negras. Pero en el caso de *L. hasselti*,



Macho* (diminuto) *de araña dorsirroja australiana preparándose para copular con la hembra* (grande) *y ser consumido por ella

o araña dorsirroja australiana, semejante canibalismo viene propiciado porque el macho se lo busca. En 1992, Lyn M. Forster, de la Universidad neozelandesa de Otago, observó que el macho, después de insertar uno de sus dos órganos sexuales (o émbolos) en la hembra, saltaba al interior de sus fauces. La cópula proseguía mientras la hembra masticaba lentamente el abdomen del macho e inyectaba enzimas. Al final de una posible segunda cópula, el macho ya está medio digerido, y entonces la hembra lo envuelve en seda y remata la pitanza.

Desde entonces los etólogos han venido preguntándose qué objetivo podría cumplir semejante acto de inmolación. La araña macho no tiene más del 2 por ciento de la masa de la hembra, con lo que no puede ofrecer mucho alimento a la progenie; en el 35 por ciento de los casos en que la hembra rehusa comerse al macho, pone el mismo número y peso de huevos.

Maydianne C. B. Andrade, de la Universidad de Cornell, ofrece ahora una explicación basada en la competencia por la paternidad entre dos arañas macho. Un macho puede copular durante más tiempo si se deja comer, con lo que asegura la transferencia de un mayor número de espermatozoides. Asimismo, si la hembra se come al macho, tiene más probabilidades de rechazar a un segundo pretendiente, y con él a su esperma. Por lo que los machos que perecen víctimas del canibalismo acaban dejando un mayor número de hijos.

A ello debe agregarse la corta vida del macho, prolongada sólo de dos a cuatro meses después de la madurez; en comparación, las hembras viven hasta dos años, al menos en el laboratorio. Aun cuando evitara ser comido, resulta poco probable que el macho encuentre nunca a otra hembra. Por tanto, está obligado a poner todos sus recursos en la única oportunidad que tiene de reproducirse.

Madhusree Mukerjee

secuenciación completa de la región de control (el denominado bucle D) de varios ejemplares de cada una de estas ocho especies de félidos. La elección de esta zona del ADN mitocondrial se realizó según varios criterios. Entre ellos, dos fueron determinantes: la radiación evolutiva y la variación genética.

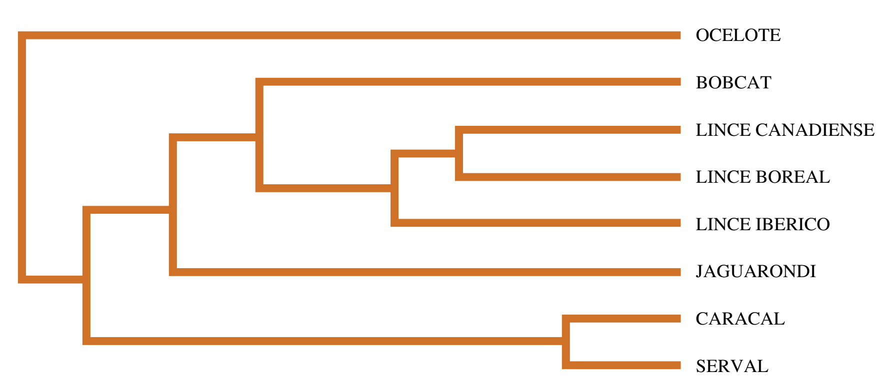
Vimos que este grupo de félidos experimentó una notable radiación evolutiva a caballo entre el Plioceno y el Pleistoceno. Asimismo, observamos una importante variación genética en la región mitocondrial mencionada, incluso en el seno de las poblaciones estudiadas. En total, secuenciamos entre 1600 y 2000 pares de bases; de ellas, 1174 se consideraron que tenían valor filogenético. Las alineamos y comparamos utilizando, entre otros, criterios de máxima parsimonia: empleando el mínimo número de pasos necesario para establecer la relaciones entre especies. De ese modo creamos el árbol filogenético consiguiente (*véase la figura 1*).

Con los resultados obtenidos se respaldaba, en primer lugar, la hipótesis monofilética. Todos los linces proceden de un antepasado común. Además, la filogenia inferida a partir de la secuenciación del ADN mitocondrial se superpoponía a la sugerida por Lars Werdelin en 1981, fundada en medidas craneales.

En segundo lugar, por lo que respecta a la ubicación taxonómica de otros géneros de félidos, los datos que nosotros hemos obtenido concuerdan con estudios recientes basados en distancias inmunitarias y secuenciación de otras regiones del ADN mitocondrial.

En tercer lugar, el lince ibérico aparece con las notas distintivas de una especie genuina: desde el punto de vista filogenético, es una unidad evolutiva autónoma que diverge del lince boreal y del lince canadiense. De acuerdo con todo ello, el lince ibérico no es, por tanto, una variante geográfica o subespecie del lince boreal, sino una especie distinta.

Un resultado tan inesperado como interesante de nuestro estudio tuvo que ver con la variabilidad genética intraespecífica. En efecto, aunque hemos examinado un número insuficiente de ejemplares (solamente tres), lo que nos impide de momento sacar conclusiones significativas para las poblaciones, vale la pena resaltar su grado de variabilidad genética, cien veces inferior al observado en el lince boreal y el rojo americano. Los tres ejemplares de linces ibéricos examinados procedían de dos poblaciones distintas, separadas varios centenares de kilómetros: el Parque Nacional de Doñana y Andújar. El lince boreal y el lince rojo americano mostraban niveles casi idénticos.



1. Filogenia del lince ibérico creada a partir de la secuenciación completa de la región de control (ADN mitocondrial) de varios individuos de cada una de las especies representadas



2. Lince ibérico

Pese a su provisionalidad, los resultados sobre variabilidad genética constituyen un acicate para acometer ulteriores estudios de las últimas poblaciones de linces ibéricos, con objeto de determinar los patrones filogeográficos (distribución espacial de los patrimonios génicos) de esta especie única, confinada a su último reducto en el suroeste de la península ibérica.

Las consecuencias de este tipo de investigaciones para la conservación del lince ibérico son evidentes. La detección de alelos únicos nos indicará las poblaciones que demandan alta prioridad de conservación, al tiempo que la determinación de distancias genéticas entre individuos resulta básica para llevar a cabo un adecuado programa de cría en cautividad.

Penoso es reconocer que los esfuerzos para asegurar la preservación de esta especie a largo plazo van muy por detrás de los conocimientos científicos disponibles, la mayor parte obtenidos en la última década. De manera implícita, nuestro estudio sobre la identidad taxonómica del lince ibérico advierte que, cuando desaparezcan los linces ibéricos de España (en Portugal se estima que quedan 40-60 ejemplares), no habrá otro lugar de donde importarlos. Todavía estamos a tiempo de evitar esta extinción anunciada.

JUAN F. BELTRÁN
Estación Biológica de Doñana, C.S.I.C., Sevilla
JOHN E. RICE
Y RODNEY L. HONEYCUTT
Departamento de Ciencias de la Vida Natural y Recursos Pesqueros, Universidad de Texas, A&M, College Station, Texas (EE.UU.)

De cerca

Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

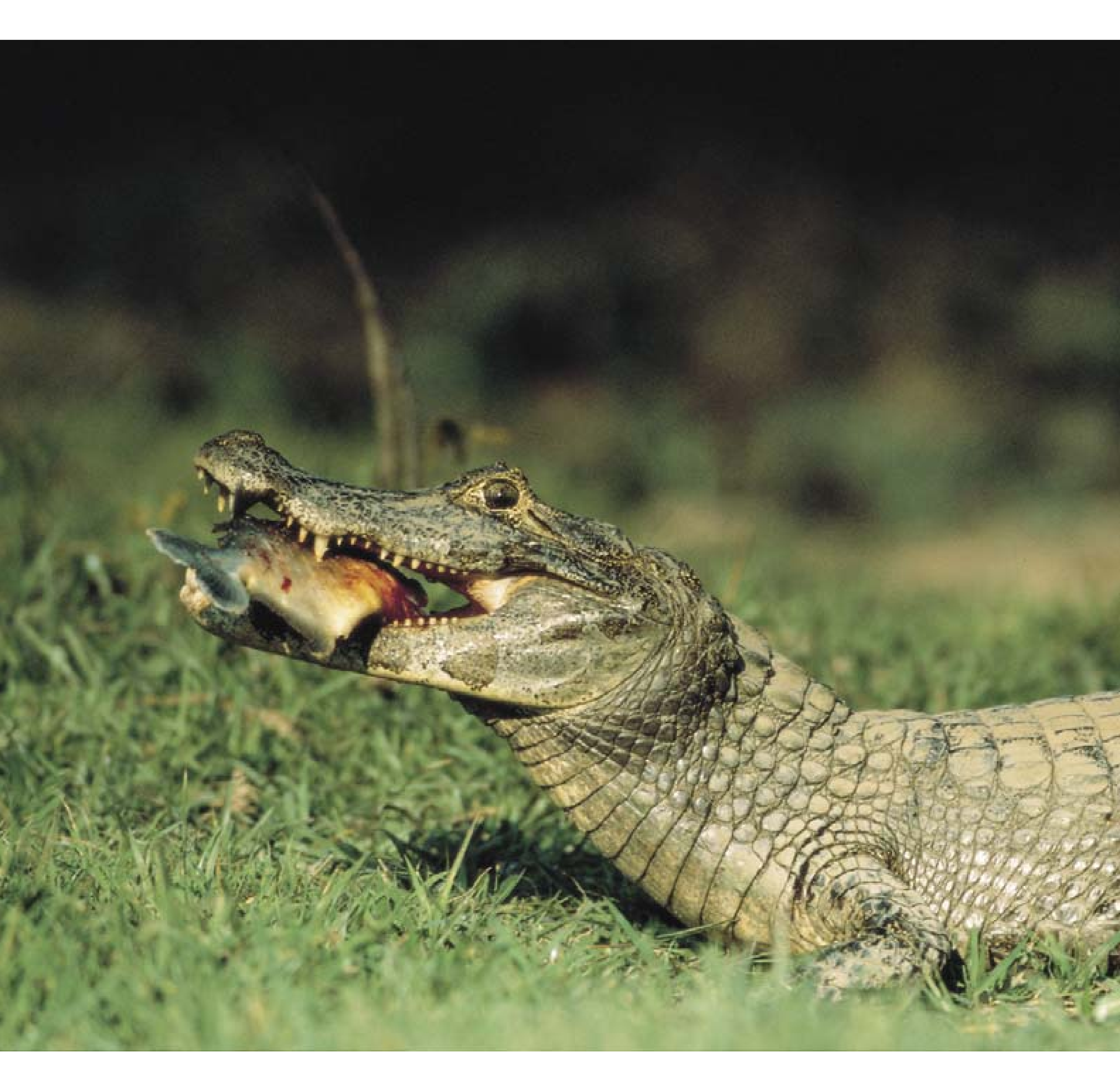
Caimán y piraña

La familia *Crocodilidae* agrupa a 21 especies vivientes. De ellas, el yacaré (*Caiman yacare*) es el representante más frecuente en el Mato Grosso brasileño y sectores adyacentes de Paraguay, Bolivia y Argentina. Puede alcanzar hasta tres metros de longitud y se alimenta principalmente de peces. Prefiere el bocado de pirañas (*Serrasalmus*), sobre las que ejerce un control poblacional importante. El género *Serrasalmus* abarca unas 60 especies, que responden en su mayoría a la denominación de piraña. Estos peces, de gustos carnívoros, agregan a su dieta en determinadas épocas del año frutos y otros alimentos vegetales.

La relación estrecha entre el yacaré y las pirañas se ha controlado en Corrientes (Argentina) y otros puntos del sector, donde la desaparición del caimán ha llevado aparejado un declive paralelo de los peces locales de interés pesquero, cuyas larvas son capturadas por las pirañas.

Las fotos están tomadas en el Pantanal de Mato Grosso, a donde habíamos acudido para contemplar yacarés tomando el sol en playones cercanos a la carretera. Observando con prismáticos desde un puente elevado pudimos seleccionar nuestra pieza cuando salía del agua con la piraña en la boca. Corrimos con nuestros trípodes y cámaras hasta el playón más cercano y lo fotografiamos con dos teleobjetivos; uno de 300 mm y otro de 500 mm. Sin embargo, la fotografía de la cabeza de la piraña corresponde a un ejemplar de acuario; se tomó con un macro de 100 mm y dos flashes a 45 grados.





Vesículas y transporte intracelular

Una colaboración transatlántica descubre los mecanismos responsables de la formación de vesículas, bolsas diminutas e indispensables que almacenan proteínas y las transportan de un lado a otro de la célula

James E. Rothman y Lelio Orci

Todas las células con núcleo —sean de colonias de levaduras, de plantas o de humanos— poseen una organización interna compleja, que se asemeja a la de una ciudad bien administrada. Quizá lo más notable estribe en que, para la buena marcha de la célula y de la ciudad, ambas cuentan con la coordinación de las actividades de departamentos especializados. En las células, tales recintos están amurallados por membranas y reciben el nombre de orgánulos.

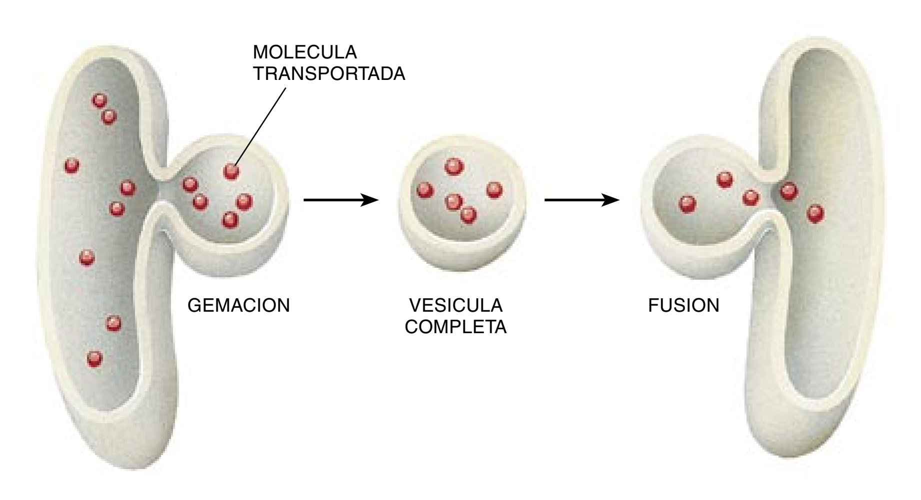
Un breve paseo por algunos de los principales departamentos de esas "ciudadelas" celulares podría muy bien comenzar por la membrana externa, ella, a su vez, un orgánulo. Esta estructura nos evoca la muralla con puertas levadizas que circundaban las ciudadelas de la antigüedad, por cuanto controla la entrada de nutrientes y otros materiales, así como la salida de productos sintetizados en su interior. Otro departamento clave, situado en el interior profundo de las células, funciona como un centro de elaboración. Se trata del retículo endoplasmático, donde se producen muchas proteínas, componentes fundamentales de las células. Las proteínas recién sintetizadas se transportan a otro departamento, al aparato de Golgi, donde se modifican (a menudo con la adición de azúcares) y, por último, se envían a otros destinos, dentro o fuera de la célula. El aparato de Golgi constituye uno de los principales centros de distribución de nuestras ciudadelas microscópicas.

Las células incluyen también sus propios centros de reciclaje, los lisosomas. Estos centros degradan proteínas viejas, y algunas otras moléculas, al objeto de que sus partes integrantes puedan remodelarse y volverse a aprovechar. Los lisosomas aceptan, asimismo, material procedente del exterior de la célula.

No sorprende, pues, que las células hayan desarrollado en el curso de la evolución un complejo sistema de transporte para trasladar proteínas de un orgánulo a otro. Dicho sistema se organiza a la manera del fletaje de mercancías en los aeropuertos. Todas las mercancías que comparten destino se empaquetan en un contenedor común, al que se da el nombre de vesícula transportadora, que se abre sólo cuando llega al destino previsto. Cada célula produce muchos tipos de vesículas transportadoras, y cada tipo se especializa en una vía de transporte intracelular o una clase de cargamento. Las células fabrican también vesículas de transporte que almacenan sustancias clave para la comunicación intercelular (por ejemplo, neurotransmisores e insulina); estos transportadores vierten fuera de las células su cargamento en respuesta a señales precisas.

Sin duda, las vesículas transportadoras son vitales para muchos aspectos del funcionamiento, no sólo de una célula determinada, sino también del organismo entero. Pese a ello, durante muchos años se ignoró su proceso de formación. Recientemente, los autores y sus colaboradores han perfilado bastantes detalles moleculares de su formación. Además del interés intrínseco, los resultados podrían revestir también gran valor para la medicina. Pensemos, por ejemplo, que las células tumorales sólo se multiplican si sus vesículas transportadoras funcionan adecuadamente. Por consiguiente, las sustancias que impidieran la formación de vesículas podrían agregarse a la farmacopea anticancerosa disponible.

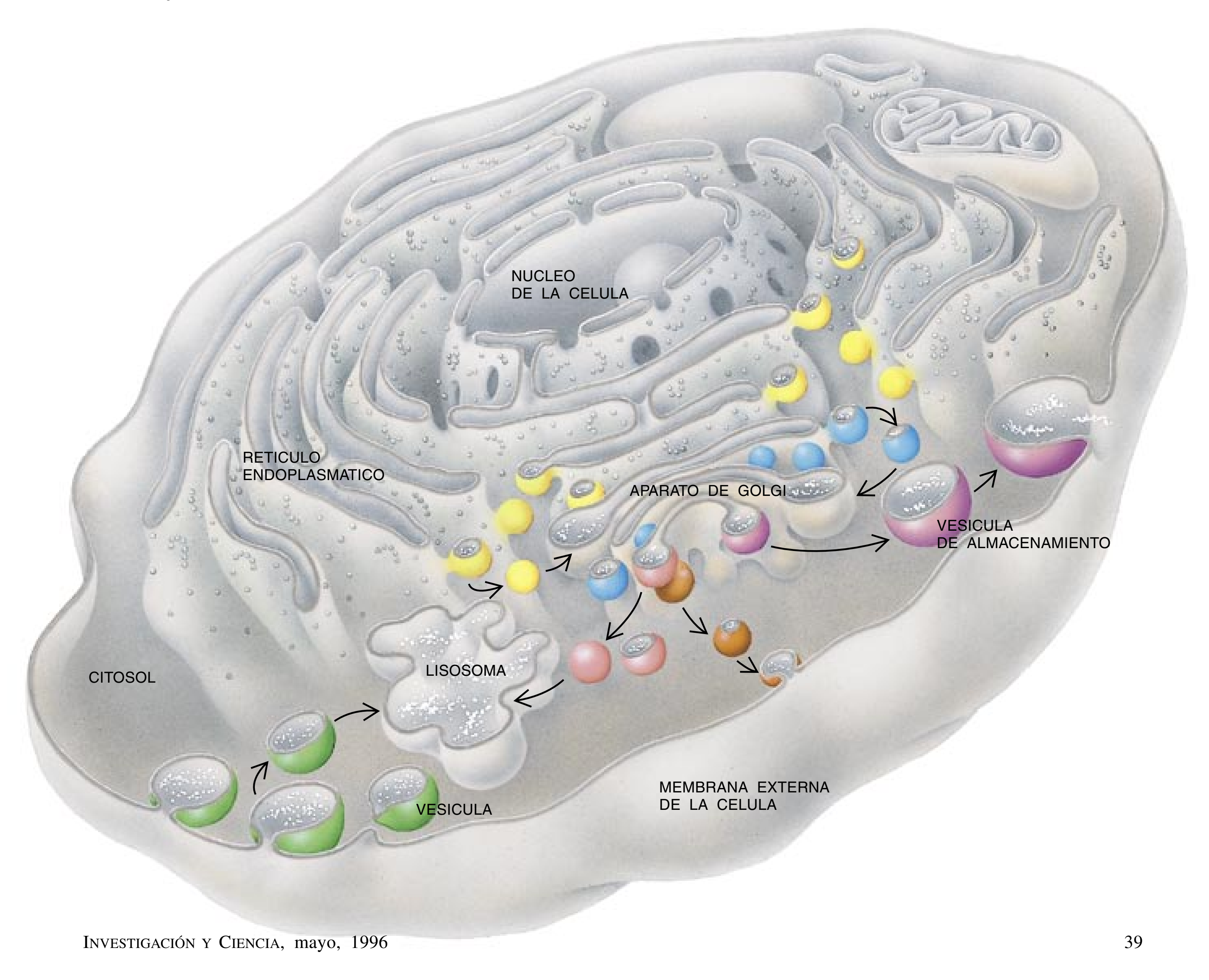
Nuestra descripción se asemeja en muchos aspectos al guión característico de la biología celular moderna. En efecto, tiene sus orígenes en la microscopía (que reveló la existencia de las vesículas transportadoras) y su resolución en la bioquímica (que ha ahondado en las reacciones moleculares implicadas en la formación de las vesículas). Esta historia ilustra también la verdadera naturaleza de la investigación científica. Los ajenos al quehacer de la ciencia tienden a considerar los descubrimientos como



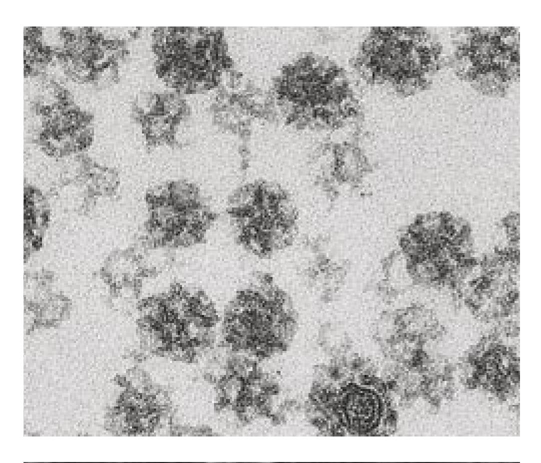
un proceso impersonal, en que la pura reflexión intelectual conduce, por lógica inexorable, a la solución nítida del problema. Esta visión de las cosas subestima el papel que desempeñan los pasos en falso, los golpes de suerte y la tenacidad sin descanso. Las descripciones de los manuales no captan el encanto de esa búsqueda en pos de la presa. En nuestro caso, una buena parte de dicho disfrute tuvo que ver con el hecho de que trabajábamos en estrecha asociación, a pesar de encontrarnos separados por el océano Atlántico, lo que limitaba nuestros encuentros a una visita anual.

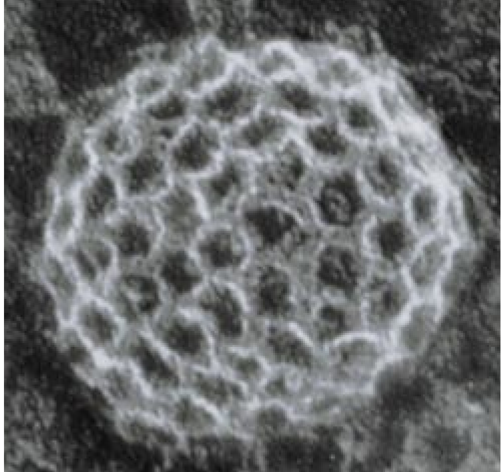
Nuestra colaboración empezó a mediados de los ochenta. Antes, los microscopistas que examinaban cortes celulares habían descrito ya ciertas etapas básicas del transporte vesicular de proteínas. Gracias en buena medida a las investigaciones realizadas en los sesenta por el premio Nobel George Palade, que entonces trabajaba en la Universidad de Rockefeller, se sabía que las vesículas se originaban probablemente por un proceso de gemación de la membrana de un orgánulo, a partir de la cual se formaban diminutos sáculos membranosos. Cada receptáculo de éstos emigraba después a través del citosol (el medio rico en proteínas en el que flotan los orgánulos) y se adhería a la membrana externa de un orgánulo específico, el de destino. La membrana de la vesícula se fundía entonces con la del orgánulo y derramaba el contenido proteico en el interior del compartimento de destino. En otras palabras, el "contenedor" se abría en el punto de destino y se liberaba todo el cargamento.

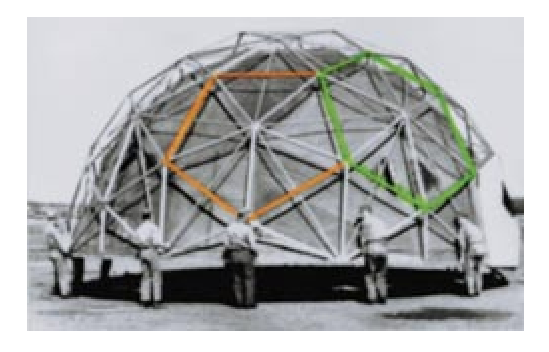
Para esclarecer el mecanismo de la gemación se veía necesario estudiar el proceso en el tubo de ensayo; es decir, había que reproducir la formación de las vesículas fuera de la célula, eliminando los elementos extraños. Con un sistema de este tipo se podrían manipular, o en cualquier caso analizar, los componentes de la maquinaria de formación de vesículas para determinar qué moléculas intervienen en un primer paso, cuáles en el siguiente, y así sucesivamente. Pero nadie había conseguido ese sistema



1. LAS VESICULAS transportadoras (*esferas de color*) abundan en las células. Algunas (*amarillo*) trasladan proteínas sintetizadas en el retículo endoplasmático hasta el aparato de Golgi, donde sufren ulteriores modificaciones. Otras (*azul*) llevan proteínas de un compartimento a otro dentro del aparato de Golgi. Tres clases de vesículas son expedidas desde este aparato: una (*naranja*) exporta proteínas al exterior de la célula. Otra —la vesícula de almacenamiento (*rosa oscuro*)— libera su contenido cuando recibe la señal oportuna. Una tercera (*rosa pálido*) introduce enzimas digestivas en los lisosomas, cámaras que degradan diversas moléculas, incluidas las aportadas a la célula por otras vesículas (*verde*). La vesícula (*página opuesta*) se forma por gemación a partir de un orgánulo; libera su carga (*rojo*) al fundir su membrana con la del orgánulo diana.







2. COMPARACION DE LAS CUBIERTAS de clatrina y de proteínas COP. Las cubiertas de clatrina envuelven principalmente las vesículas que transportan substancias desde el exterior de la célula hasta los lisosomas. Las imágenes de microscopía electrónica que muestran una sección (*izquierda arriba*) o la superficie (*izquierda centro*) de esas vesículas revelan la organización de la cubierta. Su constitución en hexágonos y pentágonos semeja la de una cúpula geodésica (*izquierda abajo*). Las cubiertas compuestas de proteínas COP (*derecha*) recubren las vesículas transportadoras que emergen del aparato de Golgi y son estructuralmente muy distintas de las cubiertas de clatrina.

"acelular" hasta 1980, que fue cuando uno de nosotros (Rothman) lo logró en la Universidad de Stanford.

En 1984 Rothman y sus colaboradores publicaron un artículo en el que comunicaban que, con su sistema acelular, recreaban el proceso de formación de vesículas que se sabía que tenía lugar en la célula. Se había conseguido que las vesículas transportadoras emergieran por gemación de las membranas del aparato de Golgi, que consta de varios compartimentos vinculados. La mayoría de las vesículas derivadas de las membranas del aparato de Golgi transportan su cargamento de un compartimento a otro; vesículas de este tipo eran las que se observaban. Sin embargo, algunas vesículas del aparato de Golgi acarrean su contenido proteico hasta lugares más distantes.

En esa etapa comenzó nuestra colaboración. Ocurrió, además, de una manera memorable. Un día, a última hora de la tarde, al cabo de una semana escasa de haber aparecido el artículo de diciembre de 1984, sonó el teléfono en el despacho de Rothman. Interrumpiendo su trabajo, Rothman levantó el auricular y, antes de que pronunciara el acostumbrado "diga", le llovió un monólogo, de voz recia y precipitada, en un idioma que, pretendiendo ser inglés, sonaba a italiano. Resultaba ininteligible. Rothman, persona poco dada a la locuacidad, se sumió en un profundo silencio y, perdido, continuó con sus papeles mientras fluía la perorata telefónica. Al cabo de unos minutos, pudo reconocer algunas palabras que querían expresar algo así como "colaborar" y "seremos hermanos". Ante semejante frustración, gritó "¿Quién *es* usted?".

La voz adquirió entonces un ritmo más pausado y claro, incluso modesto. Para anunciarse: "Soy Lelio Orci, un profesor de la Universidad de Ginebra, y trabajo sobre..."

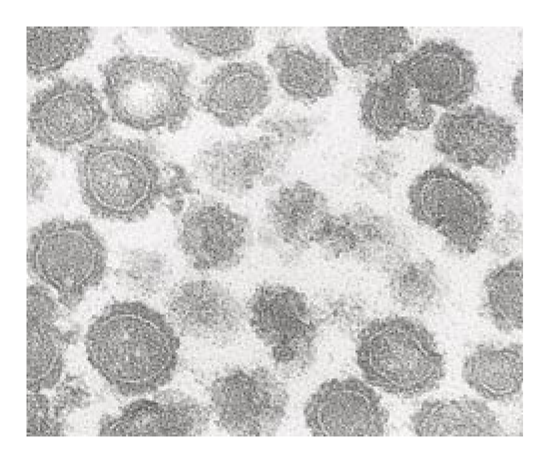
Por supuesto, reconoció inmediatamente el nombre. Orci gozaba de predicamento por sus trabajos de microscopía electrónica. Rothman se disculpó. El italiano empezó a hablar más despacio, y en aquel momento tuvo lugar un largo y fecundo intercambio de ideas, a pesar de que en Ginebra estaba ya bien entrada la medianoche.

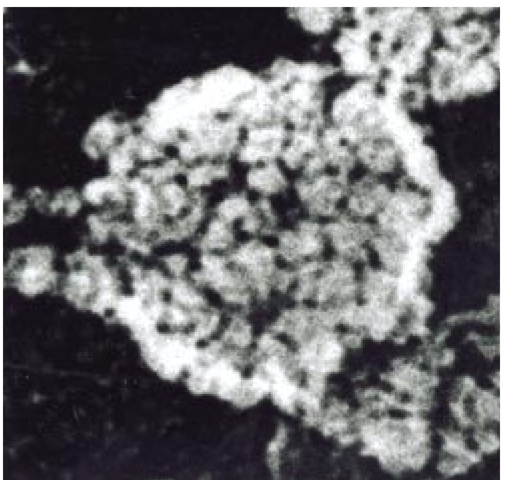
Unas semanas después, Rothman se encontraba en Ginebra, y los dos nos fuimos animando mientras trazábamos un plan con el cual las técnicas de Orci podrían determinar si las vesículas formadas en el tubo de ensayo a partir de membranas del aparato de Golgi tenían alguna propiedad especial. Queríamos averiguar, en particular, si las vesículas estaban rodeadas por una cubierta de clatrina: envoltura muy densa constituida fundamentalmente por dicha proteína fibrosa. Desde el punto de vista estructural, la cubierta de clatrina semeja una cúpula geodésica.

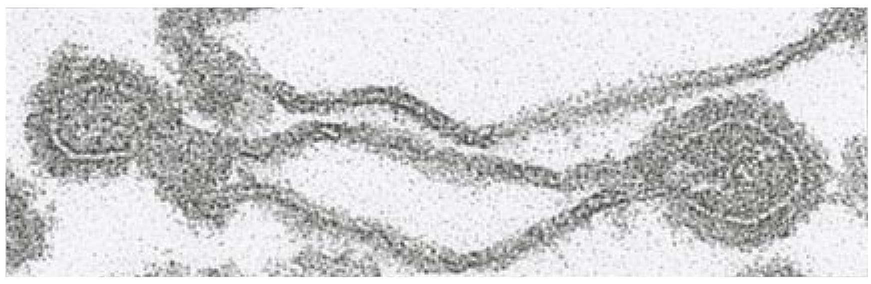
Nos planteamos esta cuestión porque se sabía que ciertas vesículas transportadoras poseen tales revestimientos, en realidad los únicos conocidos entonces. (Las vesículas transportadoras recubiertas de clatrina transportan proteínas desde el exterior de la célula hasta los lisosomas para su degradación; la gemación arranca desde la membrana celular externa hacia el interior del citosol.) Pero el mecanismo de gemación vesicular no podía descifrarse al no disponerse de un sistema experimental adecuado. Si Orci conseguía confirmar que las vesículas derivadas del aparato de Golgi se revestían de un manto de clatrina, acto seguido Rothman podría comenzar los estudios bioquímicos para establecer un modelo sobre la formación de esas vesículas.

Un primer modelo había surgido en los años sesenta de la investigación iniciada por Toku Kanaseki y Ken Kadota, de la Universidad de Osaka. En 1969 Kanaseki y Kadota purificaron vesículas recubiertas y observaron que mostraban una estructura sorprendentemente regular. La razón de esta regularidad se hizo manifiesta seis años después, cuando Barbara M. F. Pearse, del Laboratorio del Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge, descubrió que la cubierta estaba constituida fundamentalmente por múltiples copias de una proteína, a la que ella misma dio el nombre de clatrina. Kanaseki y Kadota supusieron entonces que la propia cubierta era la responsable del proceso de gemación. Conforme se desarrollaba la funda, presumiblemente a partir de componentes de la membrana, deformaba la mem-

JAMES E. ROTHMAN y LELIO ORCI colaboran en sus trabajos de investigación desde hace más de un decenio. Rothman dirige el programa de bioquímica y biofísica celular en el Centro de Investigaciones sobre el Cáncer Memorial Sloan Kettering. Orci es director del departamento de morfología y profesor de histología y biología celular de la facultad de medicina de la Universidad de Ginebra (Suiza).







3. GEMACION de dos vesículas revestidas de COP a partir de una membrana del aparato de Golgi.

brana subyacente (estructura dotada de una gran plasticidad) hasta que adoptara una configuración en cúpula, succionando literalmente de la membrana externa una vesícula esférica y cualquier proteína que a ella estuviera unida.

En 1984 tal propuesta resultaba ya un tanto simplista. Cuando Rothman demostró la gemación vesicular en el tubo de ensayo, vio que el proceso de gemación no se ponía en marcha con sólo membranas aisladas. La formación de vesículas requería la presencia del citosol y de una fuente de energía. Estos resultados sugerían que la cubierta debía derivar, en cierto modo, de sustancias presentes en el citosol. No obstante, el modelo de Kanaseki y Kadota mantenía su atractivo y merecía ponerlo a prueba.

Al poco del regreso de Rothman a Stanford, uno de sus alumnos de doctorado comenzó a ejecutar nuestro plan. Benjamin S. Glick generó vesículas transportadoras en el tubo de ensayo mediante la incubación del aparato de Golgi con citosol y una fuente de energía. Envió entonces las muestras a Ginebra para su análisis microscópico. En cuestión de días, Orci determinó que las vesículas derivadas del aparato de Golgi estaban, en efecto, envueltas por una cubierta, pero no del tipo que se esperaba. Su fina estructura difería de la característica de la clatrina; además, ese material no lo reconocían los anticuerpos que se unen específicamente a la clatrina. Este sorprendente resultado significaba que las células fabricaban al menos dos tipos de vesículas transportadoras, revestidas por cubiertas diferentes. Hoy se nos ofrecen ya muchos tipos de vesículas transportadoras, cada una con una cubierta distinta.

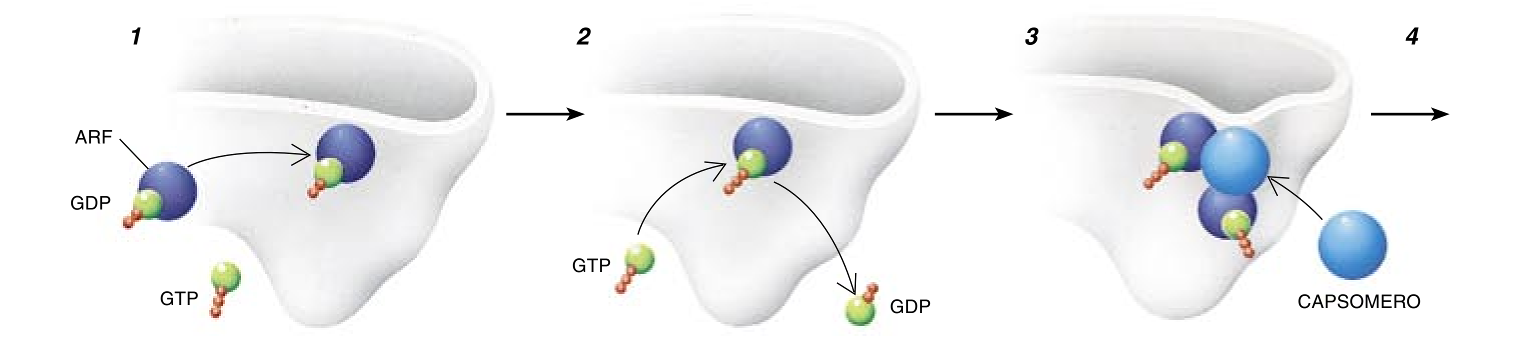
El resultado de ese estudio constituye un ejemplo admirable del valor imprevisto de los pasos en falso. Nuestra hipótesis incorrecta —las cubiertas de clatrina mediaban la formación de las vesículas transportadoras en el aparato de Golgi— nos llevó a realizar un experimento que desvió nuestra atención de las vesículas revestidas de clatrina a un nuevo tipo de vesículas que acabábamos de identificar. Nuestro error nos lanzó hacia una nueva y fecunda vía de investigación que nos permitiría averiguar muchos detalles sobre la aparición de vesículas transportadoras. (Hecho que contrasta con el lento desarrollo experimentado por el conocimiento sobre la formación de las vesículas cubiertas de clatrina. Hasta hace poco no se había conseguido estudiarlas en el exterior de la célula.)

Como primer peldaño para desentrañar el proceso de gestación de las vesículas derivadas del aparato de Golgi, necesitábamos saber cuál era la composición de su cubierta. Un reto con el que tuvimos que batallar varios años. De entrada, había que conseguir un suministro de gran pureza de estas minúsculas esferas, tarea descomunal en aquel momento. Tras un tenaz empeño, Vivek Malhotra y Tito A. Serafini, jóvenes investigadores del laboratorio de Rothman, aislaron en 1989 una cantidad ínfima, pero suficiente para hacer los análisis y permitirles demostrar que la cubierta contenía ocho proteínas. Les dimos el nombre de proteínas COP (de la expresión inglesa *co*at *p*rotein, o proteína de cubierta). Muy pronto se impuso la costumbre de llamar, a las vesículas derivadas del aparato Golgi, vesículas revestidas de COP.

Para esclarecer el mecanismo de gemación vesicular, debíamos conocer más a fondo las proteínas COP y sus mutuas interacciones. Dimos un gran paso en esa dirección en 1990, cuando descubrimos que siete de estas proteínas de la cubierta se ensamblaban en un macrocomplejo antes de anclarse, como una sola pieza, en la membrana de Golgi; bautizamos la unidad en cuestión con el nombre de "coatómero" (del inglés *coat*, cubierta). Sólo la octava proteína se encajaba por sí sola. En esencia, pues, la cubierta constaba de dos elementos fundamentales: el "coatómero" (que en adelante llamaremos *capsómero* de acuerdo con la regla de construcción de las palabras en castellano que obliga a formarlas a partir de dos raíces griegas, o dos latinas, y prohíbe cualquier otro tipo mixto de construcción) y una octava proteína. Este descubrimiento, profundamente simplificador, nos permitiría desgranar las piezas que integraban los pasos principales del proceso de gemación, sin tener que estudiar por separado cada una de las proteínas del capsómero.

En ese momento, la suerte y nuestra perspicacia nos permitieron realizar un descubrimiento fortuito. Entrada la noche de cierto día de 1990, M. Gerard Waters, un joven investigador del laboratorio de Rothman (entonces en la Universidad de Princeton), examinaba los resultados de sus intentos por purificar una sustancia necesaria para que las vesículas transportadoras se fundieran con las membranas de los orgánulos de destino. Por pura coincidencia, Serafini apareció en el laboratorio y, cuando miró por encima del hombro de Waters, se quedó asombrado de lo que vio.

Para purificar una proteína, se separan los componentes de un extracto



celular en diferentes fracciones según sus propiedades físicas y químicas. Estas fracciones se analizan a continuación para comprobar si presentan la actividad buscada (por ejemplo, impulsar la fusión de una vesícula con una membrana). Las muestras que presentan actividad se vuelven a subdividir en fracciones más purificadas que se analizan de nuevo. En cambio, las fracciones inactivas suelen desecharse. Al final, se obtiene una muestra que contiene exclusivamente la proteína responsable de la actividad biológica de interés: una proteína pura.

Para ser más concreto, Waters había analizado el contenido proteico de una fracción que no parecía inducir la fusión. Durante meses, había descartado, con lógica, tal fracción por inútil. Serafini se quedó perplejo ante la semejanza entre las proteínas de la fracción que Waters descartaba y las que Malhotra y él habían identificado previamente como proteínas COP.

Tras una comprobación rápida se vio que el material desechado estaba constituido, de modo casi exclusivo, por siete de las proteínas COP, firmemente engarzadas unas con otras. Nosotros sabíamos que estaban asociadas porque la fracción se oponía con tenacidad a cualquier subdivisión ulterior. Por ironía de las cosas, mientras una parte del laboratorio de Rothman había puesto todo su empeño en aislar las vesículas revestidas (para conseguir cantidades traza de proteínas de la cubierta), otra parte estaba arrojando por el sumidero precisamente esas proteínas en grandes cantidades. Gracias a la llamada de atención de Serafini y de Waters, se suspendió el derroche, se reconoció la existencia del capsómero y se ahorraron años de esfuerzo. Teníamos ahora a nuestra disposición una fuente ilimitada de proteínas del capsómero.

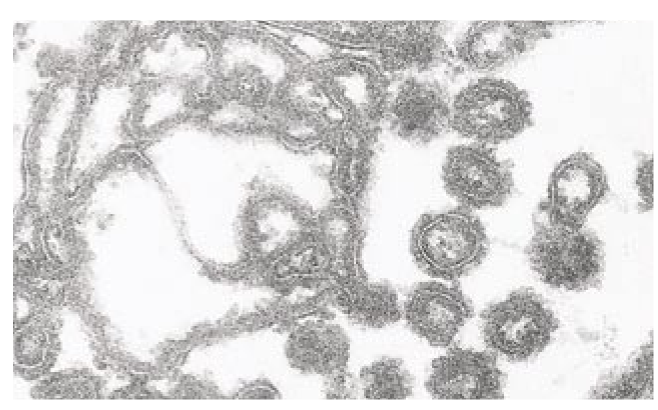
Volvimos la mirada hacia la identificación de la octava proteína. Por muchas razones sospechábamos que se trataba de una molécula llamada ARF (*f*actor de *r*ibosilación del *A*DP). Habían descrito esta molécula Richard A. Kahn y Alfred G. Gilman, de la facultad de medicina de la Universidad del Suroeste de Texas. Se sabía que era la que confería a la toxina colérica sus propiedades patógenas. Pero su función normal en el organismo constituía un misterio. Por fortuna, resultó fácil confirmar nuestra sospecha. Kahn nos proporcionó los anticuerpos que reconocían exclusivamente el ARF. Mezclamos entonces los anticuerpos con nuestra proteína. Los anticuerpos se unieron de inmediato, señal de que la proteína era en efecto el ARF.

Tras seis años de tenaz empeño, disponíamos de todas las proteínas de la cubierta en estado puro. Estábamos preparados para descifrar el mecanismo de la gemación vesicular. Esta tarea fue ya más sencilla. Comenzamos el proyecto en 1991, después de que Rothman hubiera trasladado su laboratorio al Centro de Investigaciones sobre el Cáncer Memorial Sloan-Kettering, y en apenas dos años avanzamos muchísimo.

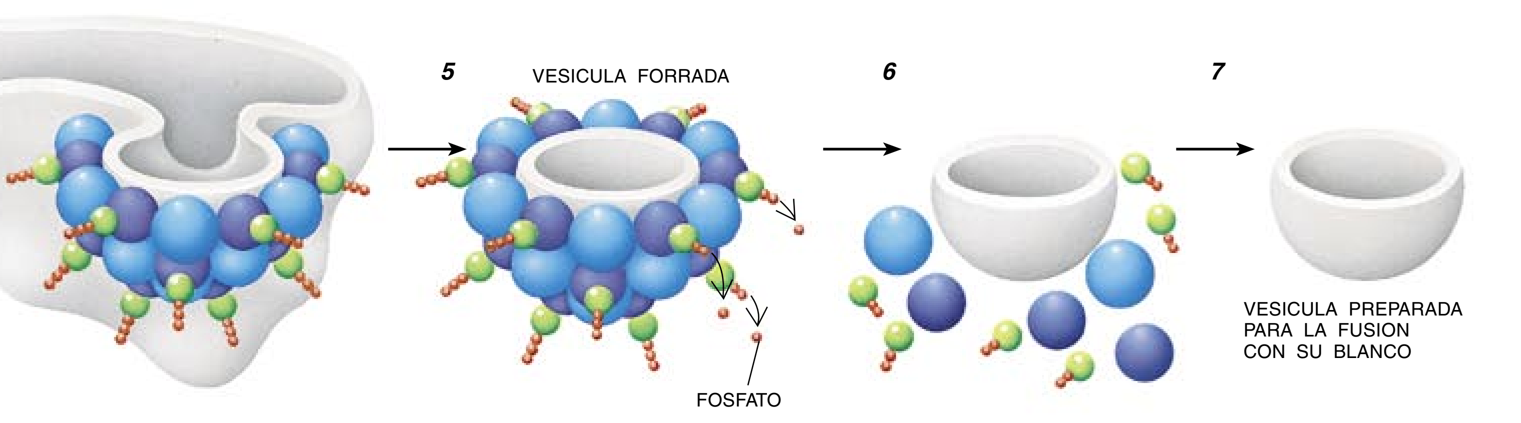
Comenzamos por plantearnos si el capsómero y el ARF eran las únicas proteínas necesarias para la formación de las vesículas revestidas de COP. ¿Se requería tal vez la contribución de otras proteínas? ¡Los dos elementos fueron suficientes! Aunque habíamos empezado con extracto citosólico crudo, que contenía millares de proteínas diferentes, el poder de la bioquímica nos permitió seleccionar las dos que importaban —el capsómero y el ARF— y demostrar que ellas solas bastaban para realizar la función.

El siguiente paso consistió en añadir las proteínas, una a una, en lugar





4. LA MICROSCOPIA ELECTRONICA ha revelado que el capsómero controla la gemación de las vesículas revestidas de COP. Cuando se deja que sólo el ARF se una a las membranas de Golgi no se produce la gemación; las membranas permanecen aplanadas (*izquierda*). Pero la adhesión del capsómero a las membranas a las que ya se ha unido el ARF conduce a una formación masiva de vesículas revestidas (*derecha*).



5. LA FORMACION DE VESICULAS REVESTIDAS DE COP en una membrana de Golgi se acompaña acto seguido de la separación de la cubierta. La vesícula comienza a desarrollarse (*1*) cuando la proteína ARF, que lleva unida una molécula más pequeña de GDP, entra en contacto con la membrana. Poco después (*2*), una enzima reemplaza el GDP por GTP, cambio que capacita al ARF para reclutar un complejo de proteínas denominado capsómero (*3*). El ensamblaje de ARF y las unidades del capsómero sobre la membrana inicia el proceso de gemación (*4*) y formación de la vesícula (*5*), que se separa de la membrana con su forro correspondiente. La cubierta debe desprenderse para que la vesícula se funda con el orgánulo de destino. Esa separación se produce cuando el GTP se convierte en GDP, tras la liberación de un grupo fosfato (*a la derecha en 5*), lo que provoca que las moléculas de ARF y el capsómero se desprendan (*6* y *7*).

de todas a la vez, para descifrar el papel desempeñado por cada componente. Vimos que el ARF se unía a la membrana de Golgi en ausencia del capsómero y, luego, fijaba este último a la membrana. Por sí solo, sin embargo, el capsómero era incapaz de unirse al aparato de Golgi (como también demostraron por separado Richard D. Klausner y sus colaboradores en el norteamericano Instituto Nacional de la Salud). A continuación, la microscopía electrónica reveló que, cuando sólo es el ARF el que se ha unido a la membrana de Golgi, ésta permanece lisa. Pero en cuanto se añade el capsómero al ARF, se inicia la gemación. Tales observaciones demostraban que el ARF y el capsómero desempeñaban distintas funciones en la producción de vesículas transportadoras. El capsómero promueve la deformación de la membrana y la gemación, en tanto que el ARF desencadena el proceso de la gemación vesicular (indicando al capsómero dónde y cuándo debe realizar su función).

A continuación, pudimos elucidar progresivamente las etapas intermediarias de la gemación. El ARF que flota con libertad por el citosol suele estar ligado a una molécula de difosfato de guanosina (GDP): una base nitrogenada unida a un azúcar y dos grupos fosfato. Cuando el complejo formado por el GDP y el ARF se encuentra con el aparato de Golgi, una enzima de la superficie de la membrana reemplaza el GDP por otra molécula emparentada con ella y presente en el citosol: el trifosfato de guanosina (GTP), que lleva tres grupos fosfatos. Este cambio tiene un interés doble. Por un lado, sólo el ARF unido al GTP puede engancharse firmemente a la membrana, posibilitando así el anclaje del capsómero. Por otro, la unión del GTP al ARF aporta una energía que es importante para la formación de la vesícula.

¿Cómo podríamos representar el proceso de la gemación vesicular? Los capsómeros se anclan en la membrana a través de una o varias moléculas de ARF; es probable que el número exacto de éstas ni sea fijo ni sea crítico. Pensamos (aunque se trata de algo por demostrar) que estos complejos se engarzan entre sí, según un patrón regular, para formar sobre la superficie de la membrana una cúpula (a la manera de la configurada por la clatrina). A medida que crece el número de unidades ensambladas y aumenta la curvatura, la parte de la membrana de Golgi ligada al interior de esa envoltura se transforma en una vesícula en gemación, sáculo que termina por cerrarse y desprenderse. Por eso, las vesículas revestidas de COP se generan de manera muy parecida a lo que predecía el modelo de Kanaseki y Kadota para las vesículas revestidas de clatrina. Nuestras investigaciones, sin embargo, modifican este modelo, al sugerir que una nueva cubierta o forro debe ensamblarse pieza a pieza a partir de componentes del citosol cada vez que se produce la gemación de una vesícula. Además, el ensamblaje está dirigido por el ARF y se requiere el aporte de energía en forma de GTP.

Aunque imprescindible para la gemación de las vesículas revestidas de COP, la cubierta impide la fusión de la membrana de la vesícula con la del orgánulo diana; este tipo de fusión requiere el contacto directo entre las membranas. Por consiguiente, la vesícula debe perder el revestimiento para que pueda descargarse su contenido. El desprendimiento de la cubierta se produce por un mecanismo inverso al que permite su ensamblaje. Las moléculas de ARF de una vesícula totalmente revestida siguen unidas al GTP. Pero pronto se desprenden de un fosfato del GTP, convirtiéndose éste en GDP y liberando la energía almacenada en el GTP. Tal conversión provoca que las moléculas de ARF pierdan su afinidad por la membrana de la vesícula y se separen. Como las unidades del capsómero requieren ARF para su propia unión, se disocian también, dejando detrás una vesícula desnuda, apta para fundirse con el orgánulo de destino. En cierto sentido, pues, la célula planta pequeñas "bombas de relojería" de GTP en la cubierta durante el proceso de gemación. Una vez acabado dicho procreso, se explosionan las cargas para que salte la cubierta.

Pero la cubierta se libera antes de que la vesícula alcance su destino. Por tanto, es improbable que participe en la ordenación de la vesícula hacia su blanco final. Antes bien, la membrana de la vesícula contiene una serie de proteínas que cumplen esa función. A su vez, estas proteínas atraen otras que inician la fusión de la vesícula con la membrana a la que va dirigida.

¿Surgen todas las vesículas transportadoras de acuerdo con un patrón similar al descrito para las vesículas revestidas de COP? La primera pista sobre semejante posibilidad llegó con el descubrimiento de que el ensamblaje de la cubierta de clatrina se activaba también a raíz del anclaje, en la membrana, de moléculas de

ARF ligadas a GTP. Este hallazgo, que tuvo lugar en el laboratorio de Rothman, cerraba el círculo y nos devolvía al punto del que habíamos partido.

Sin embargo, cuando se observan al microscopio, la mayoría de las vesículas de las células parecen desprovistas de cubierta. Ese dato podría dar a entender que el mecanismo de gemación aquí descrito no nos aclara nada sobre la formación de vesículas pertenecientes a tipos distintos de los que llevan cubiertas de COP o de clatrina. Una conclusión, a buen seguro, precipitada. Puesto que las cubiertas se desprenden rápidamente una vez terminada la gemación de la vesícula, los métodos habituales para detectarlas suelen resultar insuficientes. En efecto, la historia del descubrimiento de estas vesículas puede resumirse así: los investigadores llegaron en un comienzo a la conclusión de que cierto tipo de vesículas carecía de cubierta y que su gemación se realizaba mediante un mecanismo inédito. Se descubrió más tarde la cubierta tras conseguir reproducir la gemación de ese tipo de vesículas en un sistema acelular, lo que permitió acotar e identificar el estado transitorio, de recubrimiento.

Entre las vesículas que, según estudios recientes, requieren una cubierta se cuentan las que acarrean proteínas desde el retículo endoplasmático hasta el aparato de Golgi. Experimentos realizados por Randi W. Schekman, de la Universidad de California en Berkeley, y Orci y colaboradores han demostrado que una molécula homóloga al ARF desempeña la misma función que este factor: inicia el proceso de gemación. Además, un grupo diferente de proteínas, denominadas proteínas COP II, ocupan el lugar del capsómero.

Caben pocas dudas de que todas las células dotadas de núcleo siguen una pauta común en la formación de vesículas transportadoras. Se trata de un proceso tan eficaz, que se retuvo cuando las especies unicelulares, muy elementales, evolucionaron hacia organismos pluricelulares, más complejos. En primer lugar, ARF o una molécula con ella emparentada inicia la formación de la cubierta al captar GTP y unirse a la membrana. A continuación, este iniciador recluta otros componentes, que se ensamblan para formar una cubierta cupuliforme. Al proceder así, instan a que esa región de la membrana comience la gemación de una vesícula. Posteriormente, las moléculas de GTP promueven el desprendimiento de la cubierta para permitir la fusión con el orgánulo de destino.

Si la cubierta sólo es importante para la gemación —proceso que es básicamente el mismo en cada orgánulo— ¿por qué necesita diversos tipos de cubierta la célula? La razón más probable es que la cubierta seleccione la carga que ha de empaquetarse en la vesícula. En algunos casos, las proteínas transportadas se localizan en la membrana, directamente unidas a la cubierta. En otros, la carga se fija a la cubierta a través de un intermediario, un receptor, localizado en el espesor de la membrana. El uso de cubiertas distintas posibilitaría el fletaje de cargas diferentes desde un mismo punto de origen y desde distintos departamentos.

Quedan aún por contestar otras cuestiones, relativas en buena parte a los pormenores de la formación de la cubierta. Por ejemplo: ¿en qué modo el ARF o sus homólogos se engarzan en la membrana, y qué interacciones precisas permiten el anclaje de las proteínas del capsómero? Se sospecha que ciertos lípidos ayudan al ARF a captar el capsómero a la superficie y que las propias proteínas a acarrear podrían participar en el ensamblaje de la cubierta. Nos gustaría, asimismo, profundizar en las actividades específicas de cada una de las subunidades del capsómero. Sin embargo, nos produce satisfacción saber que muchos de los pasos fundamentales del transporte de proteínas se han esclarecido ya. No deja de ser un baño de humildad el tener que admitir que no existe ninguna ciudad organizada por el hombre que pueda igualar la sobria eficiencia con que las células, cualquiera que sea el tipo al que pertenezcan, trasladan a sus operarios de un lado para otro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ADP-RIBOSYLATION FACTOR IS A SUBUNIT OF THE COAT OF GOLGI-DERIVED COP-COATED VESICLES. T. Serafini, L. Orci, M. Amherdt, M. Brunner, R. A. Kahn y J. E. Rothman en *Cell*, vol. 67. n.º 2, págs. 239-253; 18 de octubre de 1991.

STEPWISE ASSEMBLY OF FUNCTIONALLY ACTIVE TRANSPORT VESICLES. J. Ostermann, L. Orci, K. Tani, M. Amherdt, M. Ravazzola y J. E. Rothman en *Cell*, vol. 75, n.º 5, págs. 1015-1025; 3 de diciembre de 1993.

MECHANISMS OF INTRACELLULAR PROTEIN TRANSPORT. J. E. Rothman en *Nature*, vol. 372, págs. 55-63; 3 de noviembre de 1994.

Arte y ciencia del reconocimiento fotográfico

En los años cincuenta y sesenta, la interpretación fotográfica ideó ingeniosos métodos para extraer información valiosa de imágenes recónditas. Su trabajo condicionó las relaciones internacionales

Dino A. Brugioni

Cada mañana, desde hace 35 años, un funcionario de la CIA se presenta en la Casa Blanca con un resumen impreso de informaciones reservadas y con un puñado de imágenes. Estas fotografías, aéreas o de satélite, media docena tal vez, seleccionadas entre los millares tomadas el día anterior, acompañadas de notas aclaratorias, muestran los "puntos calientes" del momento. Paquetes similares les son entregados a los secretarios de estado y de defensa, a ciertos miembros del Congreso y altos funcionarios situados en puestos clave. Durante decenios, las imágenes en cuestión han ejercido poderosa influencia en la política estadounidense.

Desde el mandato del presidente Dwight D. Eisenhower, las fotografías de reconocimiento han venido auxiliando al gobierno en la vigilancia de tropas estacionadas en el extranjero, en la supervisión de acuerdos de desarme, en la evaluación de fuerzas militares hostiles y en el desarrollo de armas de contraataque. Ya desde sus primeros tiempos —postrimerías de los cincuenta y principios de los sesenta— el moderno reconocimiento fotográfico proporcionó informaciones oportunas, que en ocasiones incluso ayudaron a que las superpotencias dieran marcha atrás estando ya al borde del conflicto armado. Estas imágenes impidieron sorpresas peligrosas e hicieron ver que ni los arsenales eran tan imponentes ni las intenciones tan siniestras como se había pensado.

Quienes manejábamos a diario estas fotografías contemplábamos un espectáculo fascinante, siempre distinto. Se va a abrir ahora al público un archivo de casi un millón de imágenes de uno de los períodos en que el reconocimiento fotográfico adquirió forma y estructura. En virtud de una orden del Ejecutivo, firmada el 23 de febrero de 1995, el gobierno de los Estados Unidos va a divulgar más de 800.000 fotografías tomadas por satélites, que fueron recopiladas por la CIA desde 1960 hasta 1972. Hasta el momento han sido varios millares las dadas a conocer; las restantes estarán disponibles en agosto.

Fue un período en el que la historia cambió de rumbo. En él, la Unión Soviética construyó sus rampas de lanzamiento de misiles balísticos intercontinentales, se libró la guerra del Vietnam, pasó de cuatro a seis (por lo menos) el número de naciones que disponían de armas nucleares y se celebraron las conversaciones SALT para la limitación de armas estratégicas entre los Estados Unidos y la Unión Soviética. Fue una época que comenzó con la construcción de instalaciones de reprocesamiento de plutonio en Israel y prosiguió con la crisis de los misiles de Cuba, con la detonación de la primera arma nuclear china, la carrera espacial y la "guerra de los seis días" en el Oriente Próximo. Todos esos acontecimientos fueron plenamente observados desde los ojos que los Estados Unidos tenían en el cielo. Las fotos tomadas por ellos revolucionaron no sólo la forma en que ese país imaginaba a la Unión Soviética y a China sino, cabría sostener, al mundo entero.

Arthur C. Lundahl, primer director del Centro Nacional de Interpretación Fotográfica, estimaba que los servicios de inteligencia apenas llegaban a despumar un 15 por ciento de la información contenida en estas películas fotográficas. La colección de imágenes desveladas abrirá nuevas vistas sobre la historia política de la segunda mitad del siglo XX, así como sobre materias que van de la arqueología a la zoología.

10 DE NOVIEMBRE DE 1962
LA COLOMA (CUBA)

Desde la altura, las seis puntas de los asentamientos de misiles tierra-aire SA-2 soviéticos evocan la estrella de David. En el centro se encuentra la estación de radar para guiado y control; la rodean seis misiles montados en sus lanzadores (próximos, cada uno, a una punta de la estrella). Las baterías SA-2, que empezaron a desplegarse a finales de los años cincuenta, se idearon para derribar aviones de ataque o de reconocimiento, por lo que la detección de estas "firmas" en imágenes de Cuba contribuyó a que los intérpretes fotográficos sospechasen que se estaba instalando algo que merecía protección. Los objetos protegidos por estas baterías resultaron ser silos de misiles balísticos de alcance mediano e intermedio.



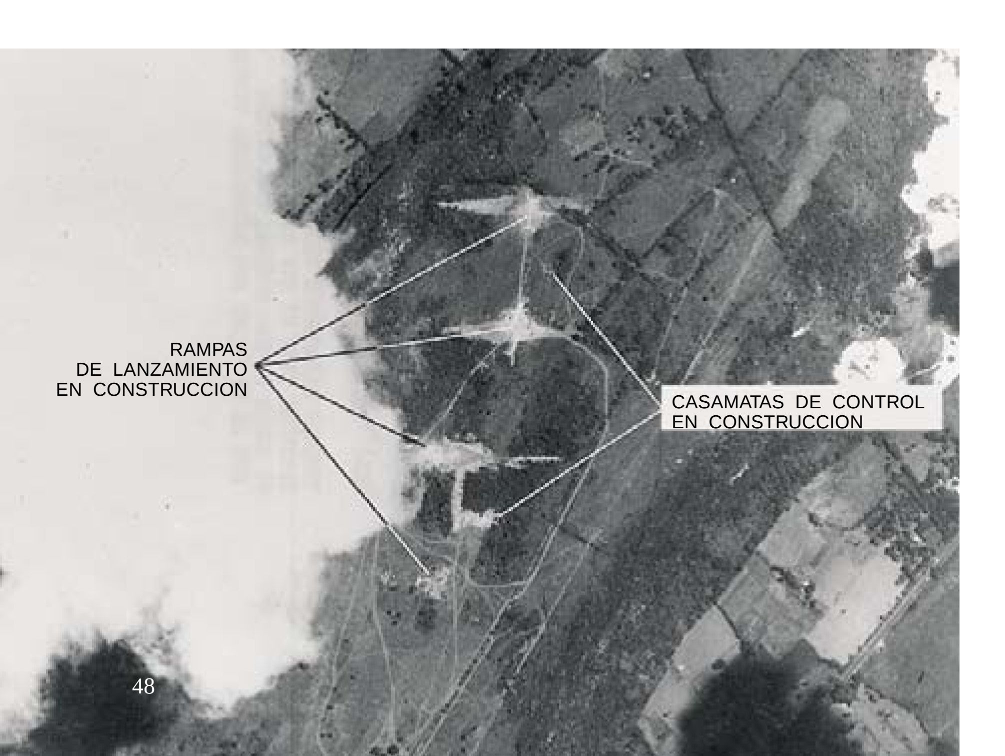
14 DE OCTUBRE DE 1962.
SAN CRISTOBAL (CUBA)

En la mañana del 16 de octubre de 1962, Arthur C. Lundahl, oficial de carrera de los servicios de inteligencia, instalado ante un atril en la sala del gabinete de la Casa Blanca, presentaba inquieto esta fotografía al presidente John F. Kennedy y a sus más importantes consejeros. Lundahl, a sus 48 años, era el mejor de los intérpretes fotográficos de los Estados Unidos. Explicaba por qué esta imagen, tomada dos días antes, inducía a pensar que habían sido desplegados en la isla de Cuba misiles balísticos soviéticos de alcance medio. Estos misiles, cuyo alcance es de 1800 kilómetros, podían batir la capital, Washington, y muchas otras localidades estadounidenses situadas más al sur. La fotografía, una instantánea tomada por un avión espía U-2 desde una altitud de 21.300 metros, muestra un grupo de siete misiles, unos cuantos lanzadores y varias tiendas de aprestamiento de misiles, que se utilizaban para dejar al misil y a la ojiva nuclear listos para lanzamiento.

Separando cuidadosamente las palabras, clavados los ojos en los de Lundahl, Kennedy preguntó: “¿Está usted seguro?”

“Señor Presidente”, respondióle Lundahl, “estoy todo lo seguro que sobre esto pueda estarlo un intérprete fotográfico. Y me parece, señor, que podría usted conceder que nunca le hemos desorientado con ninguna de las cosas de que le hemos informado. Estoy convencido, sí, de que se trata de misiles.”

Kennedy ordenó realizar el número suficiente de vuelos de U-2 que permitieran rastrear todos los rincones de la isla. Se observó que, además de los misiles de alcance medio, se encontraban en construcción plataformas para lanzamiento de misiles de doble alcance que los anteriores, capaces de batir objetivos en cualquier punto de la porción continental de los Estados Unidos, a excepción de la costa noroeste del Pacífico. Durante su confrontación con los soviéticos, Kennedy sabía, gracias al reconocimiento fotográfico, que los Estados Unidos disponían de al menos siete veces más recursos estratégicos —bombarderos de gran alcance, misiles balísticos intercontinentales, submarinos lanzamisiles— que los soviéticos.

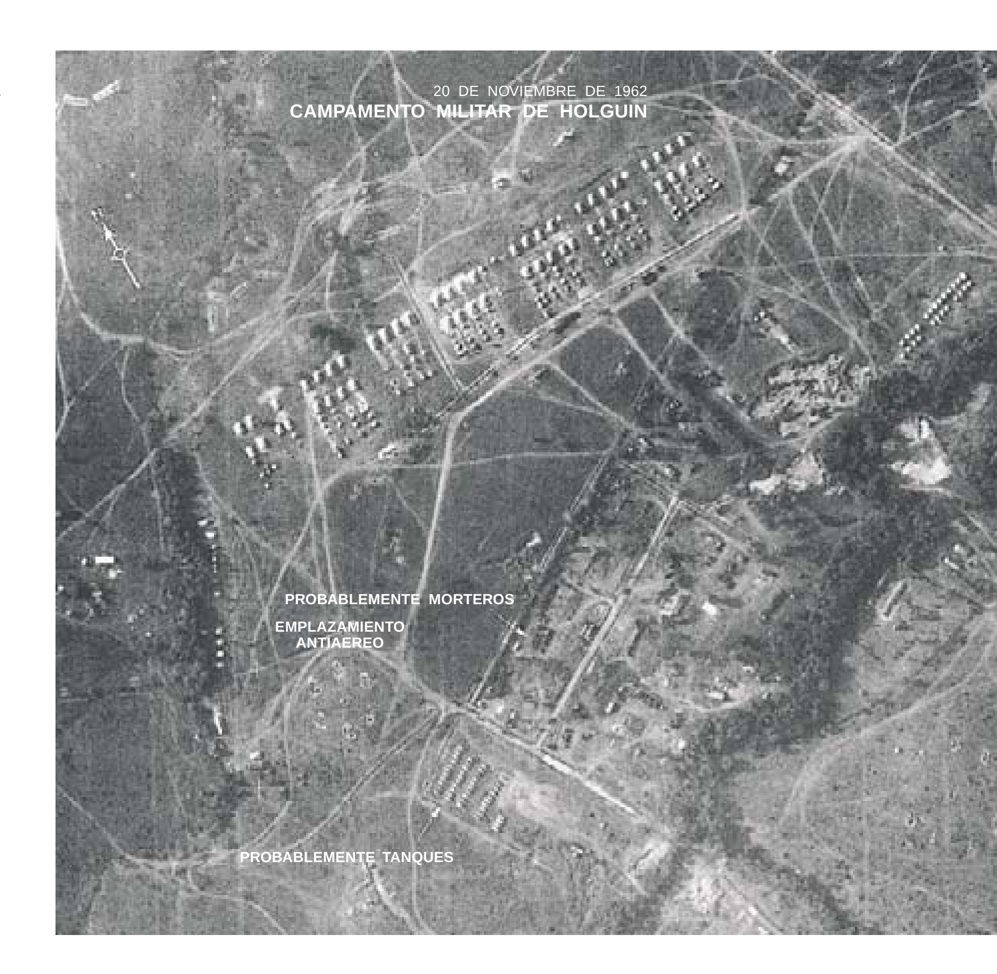


15 DE OCTUBRE DE 1962
GUANAJAY (CUBA)

Durante la crisis de los misiles de Cuba, los intérpretes fotográficos se apoyaron en el peculiar aspecto, la “firma”, de los asentamientos lanzamisiles de la Unión Soviética. Las marcas en forma de I, características indicadoras de las primeras fases de la construcción de un emplazamiento de misiles intermedios SS-5, se habían observado muchas veces en la Unión Soviética; sabíamos exactamente qué eran. En cuanto las identificamos en Cuba, Kennedy fue informado de que a los misiles de alcance medio ya instalados en Cuba iban a sumarse los de alcance intermedio, capaces de batir objetivos mucho más distantes. La rápida respuesta del presidente —el bloqueo de la isla— impidió que los soviéticos entregasen a Cuba los misiles SS-5.

**20 DE NOVIEMBRE DE 1962
CAMPAMENTO MILITAR
DE HOLGUIN (CUBA)**

Los analistas de imágenes desarrollaron ciertas disciplinas singulares, entre ellas, la "tiendología", que consiste en la evaluación de una fuerza militar por el recuento de las tiendas en que se alberga. El número y tipo de las tiendas en cuatro acantonamientos soviéticos en Cuba durante la crisis de los misiles revelaba que cada acantonamiento alojaba a unos 1500 soldados. La cuidadosa disposición de las tiendas y la ordenada alineación del material militar más moderno hizo concluir a los intérpretes que se trataba de fuerzas soviéticas de elite y no de tropas cubanas.



**18 DE AGOSTO DE 1962
OCEANO ATLANTICO, CERCA DE CUBA**

La "embalajelogía" consiste en el escrutinio de las formas, prominencias y ganchos de anclaje de los cajones en que se envía el material militar. Los cajones protegen a los equipos de los meteoros, de las salpicaduras salinas si se transportan por mar y de las miradas de los curiosos. Pero aun así, puede que los embalajes sean fotografiados en las operaciones de carga y descarga, sea por ojos en el cielo o por espías en el puerto. Incluso si no lo son, un cuidadoso análisis fotogramétrico, junto con el punto de origen de los embalajes, permite en muchas ocasiones la identificación de su contenido. En 1962, los intérpretes fotográficos reconocieron los embalajes de lanchas patrulleras Komar, que disponían de misiles teleguiados (que vemos aquí en una fotografía tomada por un avión de la marina estadounidense en vuelo a baja altura). También se identificaron aviones de caza MiG-21, bombarderos Beagle Il-28 e Il-14, enviados a Cuba por barco.



8 DE SEPTIEMBRE DE 1967
COMPLEJO DE MISILES BALISTICOS INTERCONTINENTALES DE IMENI GASTELLO, EN LA UNION SOVIETICA

Los intérpretes fotográficos estadounidenses tuvieron la fortuna de que la inexistencia de carreteras en la inmensa URSS obligase a los soviéticos a basarse en la red ferroviaria para instalar sus bases de misiles intercontinentales. Tal dependencia exigía algunos cuantos pasos más en la construcción de los silos, que a los analistas les resultaron de gran utilidad para cerciorarse de que realmente se estaba levantando un complejo de misiles intercontinentales. Para trasladar los misiles a sus emplazamientos se construyeron carreteras de primer orden, más anchas que las normales y con curvas de mayor radio, para permitir el paso hasta los silos de los remolques de misiles. En esta imagen, el silo se ve en forma de punto oscuro que contrasta con una amplia zona triangular de hormigón, de color claro, situada en la extremidad de una vía de acceso. Tres vallas de alta seguridad rodean el silo, lo que aporta nuevas pruebas de la importancia del emplazamiento.

Todas las imágenes, divulgadas o pendientes de serlo, pertenecen a un programa de la CIA, llamado en clave Corona, el primero de los planes de los Estados Unidos para el reconocimiento desde satélites. (La fuerza aérea llevó a cabo entre 1958 y 1963 un programa similar de menor alcance, denominado Samos.) Los satélites de Samos y de Corona fueron las más revolucionarias plataformas de las varias que sirvieron para echar los cimientos del reconocimiento moderno. Las otras fueron los globos fotográficos aéreos (un programa de efímera vida, conocido por Genetrix) y los raudos aviones U-2 y SR-71, de gran techo de vuelo.

Eisenhower era puesto al corriente de los resultados de todas las misiones de los U-2 y de los satélites. En aquellos tiempos todavía resonaba el ataque por sorpresa a Pearl Harbor y el presidente veía en esta técnica un medio de impedir que el futuro pudiera traer tan traumáticas experiencias. Y encontraba en ella una forma de perfeccionar la evaluación de las capacidades estratégicas de la Unión Soviética y de China.

Hacia el final de su mandato, Eisenhower consideraba al reconocimiento fotográfico uno de los escasos medios de oponerse a un complejo militar-industrial desbocado, que exageraba en conveniencia propia la capacidad de los soviéticos. Aunque los Estados Unidos han invertido muchos miles de millones de dólares en reconocimiento fotográfico a lo largo de los años, la información recogida ha pagado de sobra el costo de su despliegue, y ha permitido ahorrar en gastos de defensa caudales sin cuento. Amén de revelar la fuerza real de los adversarios, el reconocimiento fotográfico permitió una planificación más eficiente de los programas de armas contramisiles.

Corona comenzó oficialmente en enero de 1958. El decimotercero de los satélites —el primero de los que tuvieron éxito— se lanzó el 18 de agosto de 1960. En total fueron 94 los satélites del programa Corona puestos en órbita con éxito. Hubo varias generaciones, cuyo sistema de nombres en clave más duradero fue KH (de “Keyhole”, ojo de la cerradura) 1, 2, 3 y 4. Les sucedieron siete satélites KH-5 pertenecientes al programa Lanyard y un KH-6 del programa Argon.

Si todo iba bien, los satélites eran lanzados a órbitas elípticas que se elevaban sobre la superficie terrestre entre unos 150 y unos 800 kilómetros. Los satélites estaban preparados para tomar millares de fotografías durante 16 órbitas o más; en cada órbita tardaban una hora y media. (A partir de 1962 se utilizaron sistemas de doble cámara para obtener imágenes estereoscópicas.) En el momento oportuno, el disparo de un retrocohete hacía retornar a la superficie la cápsula que contenía la película. Esta y su preciosa carga, cayendo a la deriva en paracaídas, eran arrebatadas del cielo por aviones de la fuerza aérea.

La adquisición de una fotografía de satélite, por impresionante que sea el proceso, no es sino el principio. Los servicios de interpretación deben entonces detectar, identificar, describir y evaluar los objetos y configuraciones de las fotografías. Es un proceso que exige esmero, tedioso a veces, con frecuencia intuitivo. Los intérpretes analizan las imágenes por identificación de “firmas”, las peculiaridades o rasgos reconocibles que poseen especial interés. Por ejemplo, el intérprete puede siempre localizar una unidad militar acorazada por una serie de “callejas” parecidas a las pistas de una bolera, que son en realidad campos de tiro de los tanques.

Estas firmas se catalogan cuidadosamente en libros de claves de interpretación fotográfica. Cada libro se ocupa de un tema y de un país; por ejemplo, misiles desplegados en China. Los intérpretes se valen de esos libros, permanentemente actualizados.

La interpretación fotográfica recibió su bautismo de fuego durante la Segunda Guerra Mundial. Los aliados crearon un sistema basado en tres fases diferenciadas de diseminación de

la información. Durante la primera, la “relámpago”, la información estimada vital para el combate se enviaba de inmediato a los comandantes de las fuerzas. El informe de segunda fase entrañaba un estudio más minucioso de las fotografías, recogido en un informe escrito. La tercera fase era similar, aunque con análisis más detallados todavía. Con leves retoques, éste es el sistema que sigue hoy en uso. Desde 1961, la actividad depende del Centro Nacional de Interpretación Fotográfica, que se encarga de la tarea para todos los servicios de información estadounidenses.

El almacenamiento y manipulación digital de imágenes han transformado la interpretación fotográfica. Estas técnicas permiten un almacenamiento más compacto de las fotografías, un acceso a las fotos más rápido y más fácil de controlar, así como el procesamiento de imágenes para destacar rasgos de interés. Y permiten a los intérpretes consultar, para cotejarlas, una variedad de imágenes anteriores que muestran lugares idénticos o parecidos, configurados quizá para propósitos diferentes. Los expertos en fotogrametría pueden determinar

20 DE OCTUBRE DE 1964
LOP NUR (CHINA)

Al ser mayor el número de países que comenzaron a construir misiles y armas de destrucción en masa, los desiertos y otras zonas remotas fueron convirtiéndose en campos de prueba. Los analistas siempre escrutaban las fotografías de tales regiones; en ocasiones, sus descubrimientos les permitieron pronosticar sucesos de gran importancia. En diciembre de 1961, las fotografías de la región de Lop Nur, en el desierto de Taklimakan, en China occidental, revelaron una singular carretera circular de 4000 metros de diámetro. La ubicación y dimensiones de tal carretera hacían verosímil que formara parte del emplazamiento de un futuro ensayo nuclear; el área abarcada por la carretera era de tamaño suficiente para permitir un ensayo nuclear por encima del terreno que dejase intacta la carretera. Se construyeron luego un aeropuerto, barracones de alojamiento e instalaciones auxiliares. Más tarde aún fue erigida una torre de 100 metros; cuando se abrieron zanjas de tendido de líneas de comunicaciones e instrumentación desde la torre hasta vehículos dotados de equipos electrónicos, quedó claro que faltaban pocas semanas para el ensayo.

Lundahl comunicó estos descubrimientos a John McCone, director de la Agencia Central de Información. Para impedir que el gobierno chino cosechase de este ensayo una excelente propaganda, hizo notar Lundahl, tal vez el Presidente Lindon B. Johnson quisiera emitir una declaración acerca de la detonación próxima. Johnson la delegó en Dean Rusk, secretario de estado, quien, el 29 septiembre de 1964, anunció a la prensa que “desde hace algún tiempo sabemos que la China Comunista estaba aproximándose al punto que podría capacitarla para detonar un primer ingenio nuclear”. El análisis de la fotografía del 8 de octubre hizo ver que todos los preparativos del ensayo estaban concluidos, y que los obreros y equipos habían sido retirados de la zona de pruebas. El 16 de octubre, cuando los chinos ensayaron un ingenio nuclear de 28 kilotones, la noticia apenas tuvo eco internacional. Las imágenes tomadas cuatro días después con satélites KH-4 mostraron los efectos de un ensayo atmosférico en el punto donde antes se alzaba la torre.





14 DE ENERO DE 1945
CAMPO DE EXTERMINIO DE AUSCHWITZ-BIRKENAU (POLONIA)

Los reconocimientos aéreos aliados en apoyo de las misiones de bombardeo de la fábrica de combustible y caucho sintético IG Farben, realizadas en 1944 y 1945, a veces proporcionaban fotografías del campo de exterminio de Auschwitz-Birkenau, que estaba próximo. Las fotografías no se estudiaron hasta 1978, cuando el autor y Robert G. Poirier las descubrieron en los archivos del Departamento de Defensa de los EE.UU. Esta imagen, tomada el 15 de enero de 1945, en plena aproximación de las tropas rusas, muestra la nieve de la que habla Elie Wiesel en su libro *Night*. La fotografía indica que las cámaras de gas han sido destruidas o lo están siendo, y que la evacuación del complejo había comenzado ya.
La gruesa capa de nieve que recubre los tejados del campo de mujeres revela que ha sido evacuado. (La mayoría de las mujeres, entre ellas Anna Frank, fueron enviadas a Belsen; la mayoría de los hombres fueron posteriormente enviados a Buchenwald y a otros campos.) En el momento de tomarse esta fotografía, el campo de hombres y los cuarteles de las SS permanecían ocupados todavía, como nos revela el calor de los edificios, que ha fundido la nieve de sus tejados. Cada barracón del campo masculino alojaba a unos 1000 internos, así que al tomarse esta fotografía quedaban todavía unos 80.000 prisioneros (el campo encerraba, de ordinario, a unos 250.000). Evacuados los hombres útiles, unos 8000 prisioneros enfermos o extenuados fueron abandonados a su suerte, siendo liberados por las fuerzas rusas el 27 de enero.

DINO A. BRUGIONI, experto en aplicación de imágenes aéreas y espaciales a problemas de inteligencia, se graduó en política internacional en la Universidad George Washington. Durante la Segunda Guerra Mundial estuvo enrolado en el Ejército del Aire y tomó parte en 66 misiones de bombardeo. En 1948 ingresó en la CIA. Fue uno de los fundadores del norteamericano Centro Nacional de Interpretación Fotográfica.

las dimensiones de cualesquiera objetos o lugares de la fotografía a partir de datos sobre el satélite y la cámara (por ejemplo, la altitud y latitud del satélite y la distancia focal de su objetivo) gracias a un artilugio computarizado denominado “comparador”.

Otros recursos importantes del intérprete fotográfico vienen dados por la naturaleza humana y, en ocasiones, por el clima y la meteorología. La gente en general, y el personal militar en particular, vive de acuerdo con hábitos, reglas y costumbres. ¿Queremos saber cuáles son los edificios más importantes de un complejo militar? Esperemos a una nevada. Según mi experiencia, las carreteras conducentes al cuartel general o al puesto de mando son siempre las primeras en ser despejadas... así como los caminos hacia las letrinas. Los edificios que están ocupados tienen calefacción —por lo tanto, son aquellos en cuyos tejados se funde la nieve.

En casi todo el mundo, el domingo es día de descanso. Por eso, los domingos por la mañana (y las vacaciones) son el mejor momento para hacer inventario del equipamiento militar de un contrario, pues entonces se encuentra en su guarnición, aparcado o estibado. La mejor ocasión para conocer la capacidad de las fuerzas terrestres es durante unas maniobras, que por lo general se realizan en

**29 DE AGOSTO DE 1962
Y 1 A 10 DE AGOSTO DE 1994
MAR DE ARAL, KAZAKSTAN
Y UZBEKISTAN**

El mar de Aral, represadas y sifonadas sus fuentes para regadíos, se ha contraído de forma alarmante a lo largo de los 32 últimos años, como revelan estas dos fotografías tomadas por un satélite. (La imagen reciente de la derecha se compuso a partir de varias fotografías tomadas a lo largo de una semana y media.)





primavera o en verano, cuando el terreno está firme y la tropa no sufre el estorbo de una impedimenta pesada o del mal tiempo.

Las imágenes de este artículo son un minúsculo muestrario de los sucesos captados por el reconocimiento fotográfico. Entre los centenares de acontecimientos detallados se cuentan los resultados del primer gran accidente nuclear, ocurrido en 1957 en Kyshtim, en la Unión Soviética; la guerra fronteriza entre India y China de 1962; los efectos de los ataques aéreos israelíes sobre las fuerzas aéreas egipcias, jordanas y sirias durante la guerra de los seis días; el conflicto de Vietnam; los choques armados entre India y Pakistán de 1965 y 1971; la invasión de Checoslovaquia por los soviéticos; y la concentración de fuerzas a lo largo de las fronteras sino-soviéticas. El programa Corona ha proporcionado también amplia cobertura de regiones apartadas y rara vez vistas, entre ellas, Novaya Zemlya (Nueva Zembla), donde los soviéticos ensayaron sus armas nucleares; el Tíbet, usurpado por China en 1950; y el desierto de Kalahari.

Desde nuestro singular punto de observación, mis colaboradores y yo hemos comprobado la excepcional fragilidad de nuestro planeta. Hemos visto raer una y otra vez zonas casi desprovistas de vegetación en busca de leña, la tala o quema de vastas porciones de bosque ecuatorial, los efectos de desastres naturales o industriales, la contaminación de cielos, ríos y cursos de agua. Invierno tras invierno, hemos visto la nieve ennegrecida por la contaminación que en un radio de 150 kilómetros cerca a Magnitogorsk, un centro ruso de producción de acero. Lo que hemos visto hubiera dado qué pensar a quienes creen que la Tierra puede absorber sin resentirse cualquier agresión.

La divulgación de centenares de miles de imágenes del programa Corona ofrece una rara oportunidad para mejor comprender este fascinante y mudable planeta azul y sus moradores. He seguido, por ejemplo, la inexorable expansión del Sahara hacia el norte en imágenes tomadas periódicamente desde finales de los sesenta. En esas mismas imágenes podíase ver dónde habían erigido sus fuertes los romanos y comparar sus ubicaciones con los de la Legión Extranjera Francesa. Una mañana de diciembre, allá por 1968 o 1969, escogí una tanda de fotos correspondientes a una pasada de un KH-4 sobre Nazaret y Belén. Examinándolas en un visor estereoscópico seguí el viaje bíblico de la Sagrada Familia por cada monte y cada valle. He analizado el terreno donde se produjo la Carga de la Brigada Ligera y he seguido a Marco Polo en sus viajes (y, para sorpresa mía, muchas de sus descripciones aún son válidas).

Como Lundahl hacía notar hace 25 años, apenas hemos echado un vistazo a muchas de estas imágenes. A los futuros investigadores, la navegación por este océano de datos no cartografiados habrá de resultarles apasionante. Con mucha frecuencia, ya lo fue la primera vez que nos hicimos a la mar por él.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DEEP BLACK; SPACE ESPIONAGE AND NATIONAL SECURITY. William E. Burrows. Random House, 1986.

DRAGON LADY: THE HISTORY OF THE U-2 SPYPLANE. Chris Pocock. Airlife Publishing/Motorbooks International, 1989.

LOCKHEED'S SKUNK WORKS: THE FIRST FIFTY YEARS. Jay Miller. Midland Publishing, Leicester, 1993.

CORONA: AMERICA'S FIRST SATELLITE PROGRAM. Recopilación de Kevin C. Ruffner. Central Intelligence Agency History Staff and Center for the Study of Intelligence, 1995.

CORONA: SUCCESS FOR SPACE RECONAISSANCE, A LOOK INTO THE COLD WAR, AND A REVOLUTION FOR INTELLIGENCE. Robert A. McDonald en *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, n.º 6, páginas 689-720; junio de 1995.

Los electrones en planilandia

Atrapados en un plano bidimensional, los electrones exhiben el efecto Hall cuántico, sorprendente fenómeno del que ahora se cree que guarda estrecha vinculación con la superconductividad

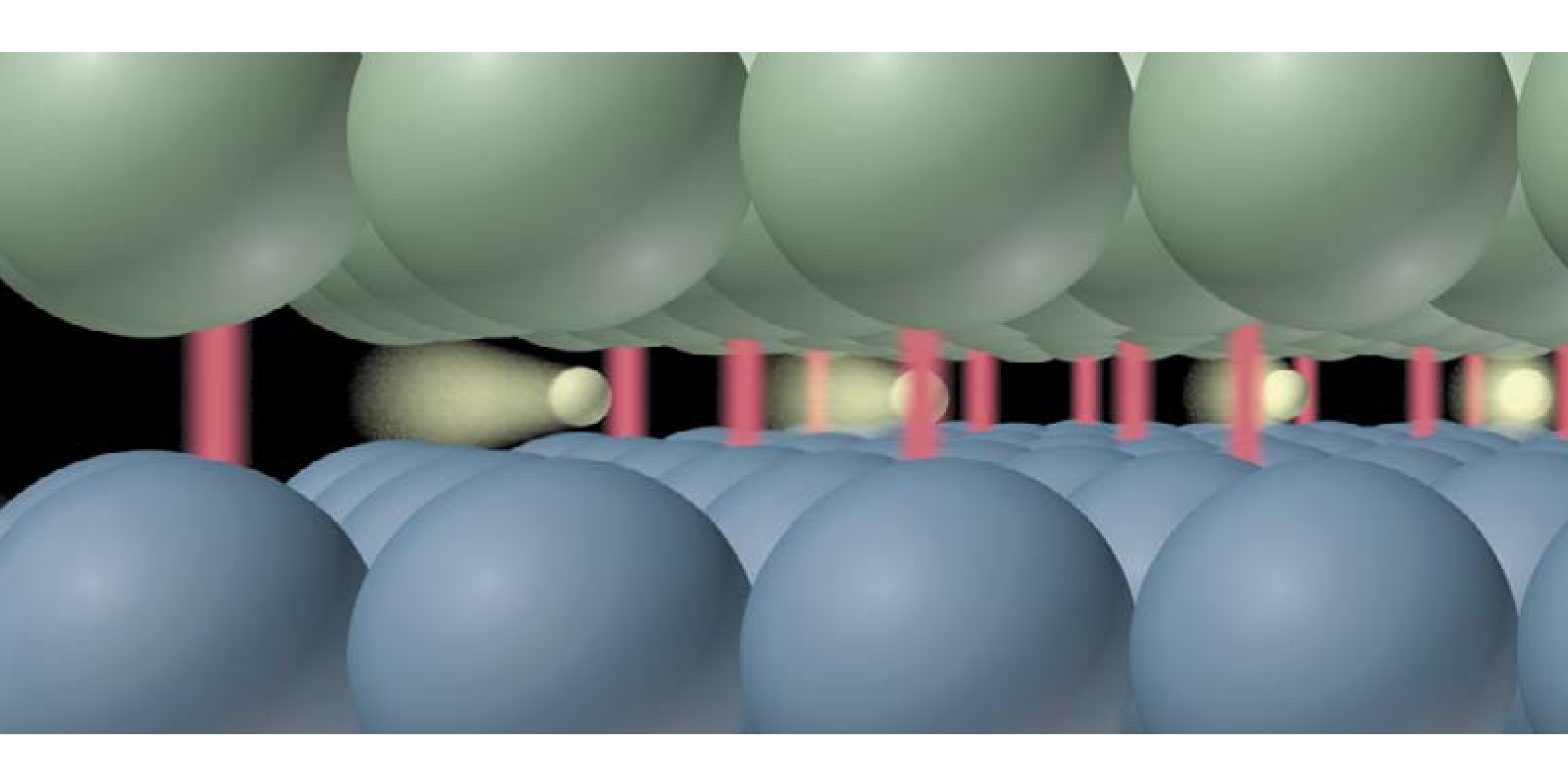
Steven Kivelson, Dung-Hai Lee y Shou-Cheng Zhang

Desde los griegos de la antigüedad clásica, uno de los objetivos centrales de toda disciplina científica ha sido el de hallar un conjunto mínimo de principios que subyazcan bajo fenómenos naturales diversos. Esta filosofía reduccionista ha operado con éxito en ciertas áreas, como la física de altas energías (el estudio de las partículas fundamentales de la fuerza y la materia). Los teóricos de esa especialidad han agrupado todas las partículas en unas cuantas familias y expresado las leyes básicas de la física a partir de sus interacciones.

La situación es muy diferente en la física de la materia condensada, el estudio de los sólidos y los líquidos. Las investigaciones efectuadas durante este siglo sobre el comportamiento de los electrones en los sólidos han descubierto varios estados de la materia donde los electrones se organizan en un sinfín de formas notables. Por ejemplo, los sólidos son, por lo normal, o aislantes (se resisten con fuerza al paso de la corriente eléctrica) o metálicos (aunque conducen bien la corriente, siguen ofreciendo un poco de resistencia). Pero en ciertas circunstancias hay sólidos que entran en un estado superconductor: la corriente eléctrica fluye por ellos sin resistencia alguna. Las caracterizaciones teóricas de esos estados han sido tan diversas como los estados mismos.

Quizás eso cambie pronto. Se ha encontrado una conexión profunda entre la superconductividad y otro fenómeno de la física de la materia condensada estudiado a fondo, el efecto Hall cuántico, que se produce cuando los electrones cumplen a la vez tres condiciones: que estén atrapados en la interfaz de dos cristales semiconductores, de forma que sólo se puedan mover en una "planilandia" bidimensional; que se enfríen hasta temperaturas cercanas al cero absoluto, y que estén sometidos a un campo magnético intenso. El campo hace que los electrones se desplacen lateralmente con respecto a la dirección de la corriente, lo que genera un voltaje, o fuerza que tira de los electrones, lateral. Si el campo magnético crece, crece también ese voltaje, aunque no linealmente, sino de una manera escalonada y precisa. En esto consiste el efecto Hall cuántico, y se le considera la señal distintiva de una fase nueva, y diferenciada, de la materia.

Cuando se descubrió en 1980 el efecto Hall cuántico, se comprendió que las propiedades de los electrones en este estado de la materia extraor-



dinario diferían fundamentalmente de las que tienen en los demás estados de la materia conocidos. Sin embargo, las últimas investigaciones han desvelado una notable relación entre el efecto Hall cuántico y el fenómeno, más común, de la superconductividad. El estudio de este vínculo ha conducido incluso a que se predigan otras fases nuevas de la materia, cuya existencia ha recibido confirmación experimental hace poco.

Puede que el efecto Hall cuántico no tenga un valor práctico inmediato, pero su investigación ha impulsado la creación de nuevos conceptos y herramientas teóricos, que seguramente traerán consecuencias de largo alcance en la física, de manera muy parecida a como la teoría de la superconductividad sirvió para que avanzase la física de partículas y el estudio de las transiciones de fase reforzó el conocimiento del universo primitivo.

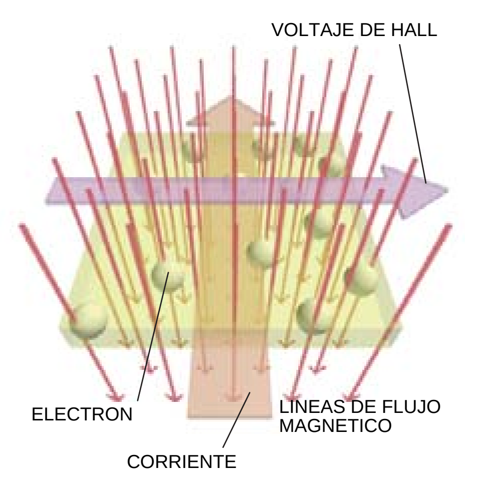
La exploración del efecto Hall cuántico también aporta una imagen de las asombrosas formas en que actúa el mundo subatómico, y espolea a los teóricos para que dibujen una visión más cabal del universo físico. Además, bien podría ocurrir que los principios en cuestión llegasen a ser importantes en las generaciones futuras de dispositivos microelectrónicos semiconductores. A medida que vayan empequeñeciendo, los dispositivos acabarán por tener unas dimensiones tan reducidas, que en su diseño desempeñarán un papel crucial la mecánica cuántica y las interacciones entre los electrones.

El descubrimiento del efecto Hall cuántico

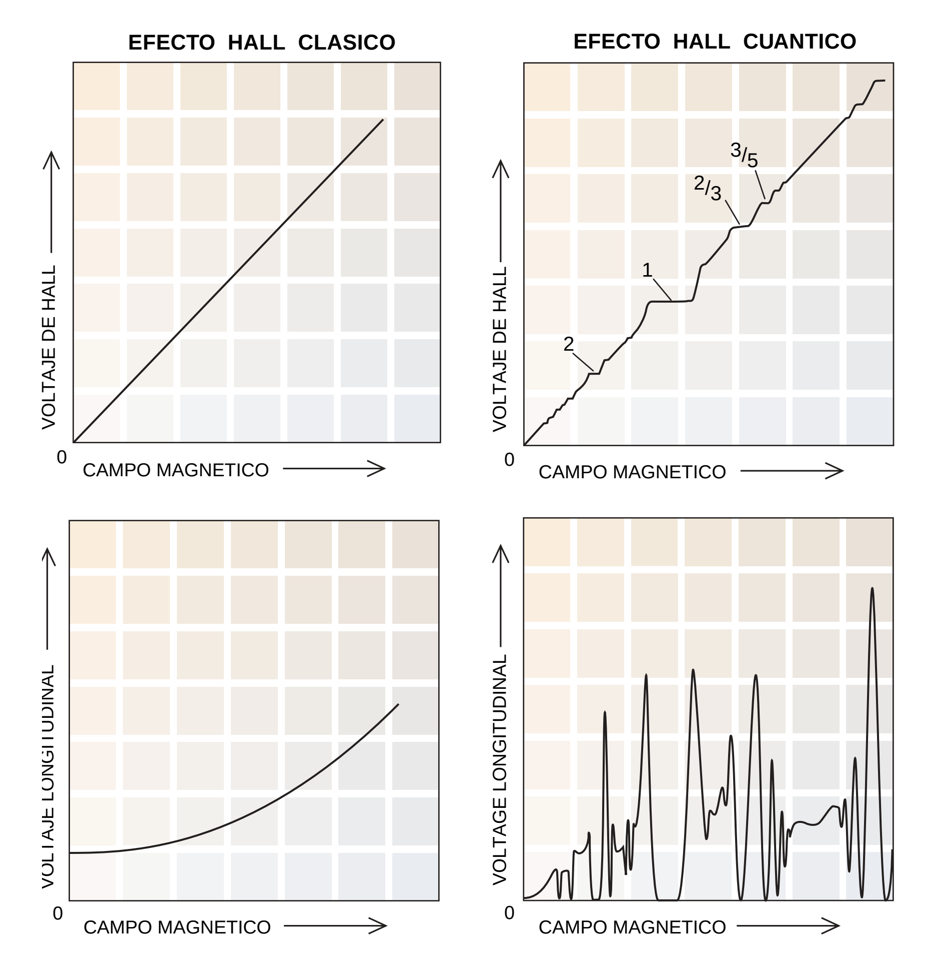
El efecto Hall cuántico es una manifestación inusual de un fenómeno más general de la conducción eléctrica, bien conocido, que descubrió el físico estadounidense Edwin H. Hall en el siglo XIX. Cuando se aplica un voltaje entre los cabos de un cable fluye una corriente. Si se somete entonces el cable a un campo magnético, los electrones que fluyen experimentan una fuerza lateral, que los redistribuye de manera no uniforme: termina por haber más electrones en el lado derecho del cable y menos en el izquierdo.

Esta distribución no uniforme de los electrones produce a su vez un voltaje eléctrico perpendicular a la dirección de la corriente. Para detectar ese voltaje lateral (el voltaje de Hall), basta con conectar los bornes de un aparato de medida corriente, un voltímetro, por ejemplo, a los lados del cable. Para una cantidad fija de corriente, el voltaje de Hall aumenta regularmente con la intensidad del campo magnético. Este fenómeno recibe el nombre de efecto Hall clásico.

En 1980 Klaus von Klitzing, por entonces en el laboratorio de electroimanes de campo intenso del Instituto Max Planck en Grenoble,



1. EL EFECTO HALL CUANTICO se da en el plano que queda entre dos semiconductores enfriados hasta cerca del cero absoluto (*abajo*); las esferas verdes y azules son los átomos de la superficie de los semiconductores. Cuando se aplica un campo magnético (*líneas rojas*), los electrones de una corriente (*en amarillo, se mueven hacia dentro*) se redistribuyen de suerte tal que hay más electrones en un lado (el derecho) que en el otro. Esta redistribución de la carga eléctrica produce un voltaje mensurable (el voltaje de Hall) y una conductancia perpendicular a la corriente (*arriba a la izquierda*). El efecto Hall cuántico consiste en el incremento escalonado de la conductancia a medida que aumenta el campo magnético.



2. LAS CARACTERISTICAS DISTINTIVAS del efecto Hall cuántico se manifiestan cuando se comparan ciertas mediciones con las relativas al efecto Hall clásico (no cuantizado). En éste, el voltaje en la dirección lateral (el voltaje de Hall) varía suavemente con el campo magnético; en la versión cuántica, hay mesetas de voltaje cuando las conductancias son iguales a ciertos múltiplos enteros y fraccionarios de una constante fundamental (sólo se anotan unos pocos múltiplos). En el efecto clásico, el voltaje longitudinal, paralelo a la corriente, varía regularmente con el campo magnético; en la versión cuántica el voltaje desaparece cuando el voltaje de Hall llega a una meseta.

Michael Pepper, de la Universidad de Cambridge, y Gerhardt Dordda, del laboratorio de investigación de Siemens en Múnich, descubrieron que el efecto Hall, bajo circunstancias especiales, no obedece las reglas usuales. Gracias a los avances de los semiconductores, es posible atrapar un conjunto de electrones entre dos semiconductores cristalinos de forma que sólo se puedan mover en un plano. Cuando enfriaron los electrones atrapados hasta uno o dos grados sobre el cero absoluto, vieron que el voltaje de Hall no crecía regularmente con la intensidad del campo magnético, sino de forma escalonada: sus valores no variaban en absoluto a lo largo de pequeños intervalos de la intensidad del campo magnético [*véase la figura 2*]. Además, el voltaje longitudinal —es decir, el necesario para mantener el flujo de la corriente— casi se anulaba cuando se llegaba a esas mesetas del voltaje de Hall. En otras palabras, los electrones se vuelven en planilandia "conductores perfectos". (En puridad técnica, no son superconductores: los electrones que lo son expelen el campo magnético; los que conducen perfectamente, no.)

Quizá lo más asombroso fuese que en cada meseta se viera que una magnitud llamada conductancia de Hall tomaba un valor especial. La conductancia de Hall es la razón entre la cantidad de corriente longitudinal y el valor del voltaje de Hall. Von Klitzing y sus colegas llegaron a la conclusión de que era, en cada meseta, igual a un múltiplo entero del cuanto de conductancia, unidad igual a 1/25.812,8 veces el inverso de un ohm (la conductancia es el inverso de la resistencia). El cuanto de conductancia es e^2/h (e representa la carga del electrón; h es la constante de Planck, que relaciona la frecuencia de un rayo de luz con la mínima cantidad de energía que puede llevar). Por su descubrimiento de este "efecto Hall cuántico entero", von Klitzing recibió el premio Nobel de física de 1985.

En 1982, Daniel C. Tsui, ahora en la Universidad de Princeton, Horst L. Störmer, de los laboratorios Bell de la AT&T, y Arthur C. Gossard, en estos momentos en la Universidad de California en Santa Bárbara, hallaron otra propiedad inesperada del efecto Hall cuántico. Descubrieron que el voltaje de Hall llegaba a una meseta más a menudo de lo que se pensaba en un principio. Se nivelaba a valores fraccionarios concretos, 1/3, 2/5, 3/7, del cuanto de conductancia. El nombre de este efecto es, claro, "efecto Hall cuántico fraccionario".

Hasta ahora, no ha habido ningún experimento que revele la menor desviación entre las conductancias de Hall medidas y los valores cuantizados. Son iguales hasta, al menos, una parte en 10 millones (siete decimales); pruebas indirectas sugieren que son iguales al menos hasta una parte en 100.000 millones. Esta precisión ha hecho que el Instituto Nacional de Patrones y Tecnología de los Estados Unidos adopte el efecto Hall cuántico como patrón para el calibrado de los aparatos de medida de la resistencia.

Factores de relleno mágicos

¿Por qué adopta la conductancia de Hall esos valores "mágicos"? Los investigadores se pasaron años intentando dar con la respuesta, que, como veremos, se halla en la fuerza con que el campo magnético afecta a cada electrón.

Para entender la solución, hay que saber tres cosas de la descripción de un campo magnético. La primera, que la mecánica cuántica representa la magnitud del campo magnético que actúa sobre una muestra con una unidad, el cuanto de flujo magnético. Una forma de representar gráficamente un cuanto de flujo es imaginarlo una flecha. Para medir la intensidad del campo magnético, basta con contar el número de cuantos de flujo —flechas— que atraviesan una muestra en un área dada.

En segundo lugar debe saberse que una magnitud importante relacionada con la intensidad del campo magnético es el factor de relleno, el número de electrones de la muestra dividido por el de cuantos de flujo magnético que penetran en ella. Cuando vale

uno, hay un cuanto de flujo por electrón; cuando es 1/3, hay tres por electrón.

En tercer lugar, existe una correlación entre los valores cuantizados de la conductancia de Hall y los factores de relleno correspondientes (los factores de relleno mágicos). Cuando el factor de relleno es uno, resulta que la conductancia de Hall es $1\,e^2/h$; cuando es 1/3, dicha conductancia será $1/3\,e^2/h$, y así sucesivamente.

Robert B. Laughlin, hoy en la Universidad de Stanford, ofreció la primera explicación de las mesetas de la conductancia de Hall. Para el factor de relleno entero se sirvió de un modelo matemático idealizado, y para el fraccionario, de otro. Este trabajo que desbrozó el camino se basó —como los de otros investigadores— en las funciones de onda, funciones matemáticas que describen todo lo que hay que saber del estado de las partículas cuánticas.

El método de Laughlin tuvo éxito, pero dejó varias cuestiones sin responder. Se basaba en ciertas simplificaciones que no se aplican fácilmente a los materiales reales, donde abundan las imperfecciones. Las funciones de onda son abstractas, así que visualizar las explicaciones de Laughlin costaba bastante. Su método no indicaba si había alguna relación entre el efecto Hall cuántico y los demás tipos de actividad electrónica en los sólidos. Por último, considerando el parecido entre los efectos Hall cuánticos entero y fraccionario, cabría esperar que se los tratase por igual y no a cada uno por su lado.

A partir de una analogía matemática precisa del efecto Hall cuántico y de la superconductividad hemos elaborado una nueva forma de abarcar el efecto Hall cuántico. Gracias a esta analogía, no sólo se unifican dos fenómenos aparentemente dispares, sino que es posible aplicar lo que se sabe de la superconductividad al efecto Hall cuántico. Este método, que complementa el de Laughlin, incorpora muchos de los hallazgos que se derivan de él; con todo, difiere claramente del mismo: se centra en los observables macroscópicos y reales del sistema físico, no en las propiedades microscópicas, apenas visualizables, de un sistema ideal.

Los primeros pasos en esta dirección nueva se dieron en 1987. Steven M. Garvin y Allan H. MacDonald, ambos ahora en la Universidad de Indiana, cayeron en la cuenta de que cabía considerar las funciones de onda con las que se explicaba el efecto Hall cuántico como la representación del estado superconductor de un nuevo tipo imaginario de partícula, el bosón compuesto. Nicholas Read, hoy en la Universidad de Yale, enunció una idea similar un tiempo después.

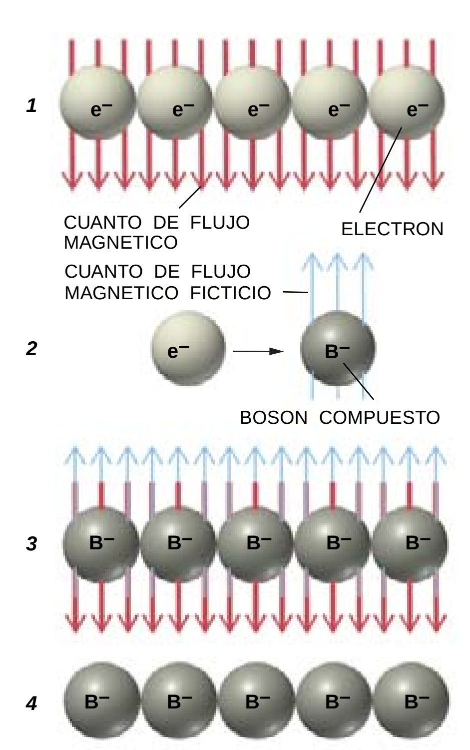
Bosones y fermiones

Los bosones son una de las dos familias en las que se agrupan todas las partículas conforme a su "estadística", o comportamiento en grupo. La función de onda que describe un conjunto de bosones no varía cuando dos partículas intercambian los lugares; la de un grupo de fermiones, por contra, cambia de signo (de positivo a negativo, o viceversa) bajo un intercambio así.

Los electrones, los protones y los neutrones son fermiones. Un átomo,

STEVEN KIVELSON, DUNG-HAI LEE y SHOU-CHENG ZHANG han contribuido, con su colaboración, a establecer la conexión entre la superconductividad y el efecto Hall cuántico. Kivelson, que recibió su doctorado de la Universidad de Harvard, desempeñó distintos puestos en varias instituciones antes de acceder a su cátedra de física en la Universidad de California en Los Angeles. Lee, que se doctoró en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, trabajó en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM antes de incorporarse al claustro de la Universidad de California en Berkeley. Zhang, hoy en día profesor de Stanford, se formó en la estatal de Nueva York en Stony Brook; pasó luego por la Universidad de California en Santa Bárbara y el Centro de Investigación Almaden de IBM.

3. LA EXPLICACION DEL EFECTO HALL CUANTICO con electrones para el factor de relleno 1/3 (*izquierda*) se obtiene en cuanto los bosones compuestos anulan el campo magnético externo (*a la derecha; por mor de claridad se ha omitido el campo anulado*). Cuando no hay un campo magnético, los bosones cargados fríos se vuelven superconductores, lo que explica la conducción perfecta en la dirección longitudinal. La inducción crea el voltaje de Hall: el movimiento del flujo magnético ficticio produce un voltaje lateral.



4. LOS BOSONES COMPUESTOS pueden representar a los electrones en el efecto Hall cuántico. Por ejemplo, cuando el factor de relleno es 1/3, hay tres cuantos de flujo (una medida de la intensidad del campo magnético) para cada electrón (*1*). Los autores imaginaron esta condición con bosones compuestos, o partículas cargadas que tienen tres cuantos de flujo magnético (ficticios) (*2*). Si el flujo ficticio se orienta en dirección contraria al flujo magnético real (*3*), se elimina el campo magnético que "ve" cada bosón (*4*), lo que facilita la construcción de un modelo del efecto Hall cuántico.

que contiene los tres, se puede considerar una sola partícula (compuesta). Que sea bosón o fermión dependerá del número de sus constituyentes: si es impar, se tratará de un fermión; si es par, de un bosón. El isótopo helio 4, por ejemplo, tiene dos electrones, dos protones y dos neutrones, y es un bosón; el isótopo helio 3 tiene dos electrones, dos protones y sólo un neutrón, y por tanto es un fermión.

Los bosones y los fermiones difieren en muchos respectos. Para este artículo, el más importante es el de las reglas que rigen la ocupación de los estados mecanocuánticos. Los fermiones obedecen el principio de exclusión de Pauli, que prohíbe que dos fermiones ocupen el mismo estado (en esencia, que se hallen en el mismo sitio al mismo tiempo). Esta regla no se aplica a los bosones; puede haber muchos exactamente en el mismo estado.

Estas dos propiedades, radicalmente distintas, de los fermiones y los bosones explican muchas observaciones físicas. Un buen ejemplo es lo diferentes que son un superconductor y un metal ordinario. La conducción eléctrica en los metales ordinarios se puede entender fácilmente a partir de las propiedades de los fermiones (en concreto, de los electrones); por el contrario, la superconductividad es una propiedad de los bosones.

¿Cómo es posible, si la corriente la llevan los electrones en todos los sólidos y son fermiones? La respuesta es que los electrones eluden en la fase superconductora las reglas fermiónicas emparejándose. Cada par actúa entonces como un bosón; todos se condensan en el mismo estado cuántico y producen la superconductividad. En el estado metálico ordinario, en cambio, los electrones conservan sus identidades fermiónicas individuales. Como son fermiones, existen en estados diferentes, conforme al principio de exclusión de Pauli, y no superconducen.

Dos de nosotros (Zhang y Kivelson), junto con T. Hans Hansson, de la Universidad de Estocolmo, presentamos en 1989 la teoría que explica el efecto Hall cuántico por medio de los bosones compuestos. Expresado en pocas palabras y de forma sumaria, planteamos que los electrones que se mueven en dos dimensiones dentro de un campo magnético intenso son equivalentes matemáticamente a un conjunto de bosones compuestos que esté en un campo magnético mucho más débil. Bajo circunstancias particulares —a saber, cuando el factor electrónico de relleno adquiere un valor mágico (en concreto, 1, 1/3 o 1/5)—, el campo magnético que los bosones compuestos experimentan es nulo. En ese caso, razonamos, los bosones compuestos se convertirían, bajo un amplio abanico de circunstancias, en superconductores. A continuación mostramos que, cuando los bosones compuestos se vuelven superconductores, producen las conductancias de Hall cuantizadas.

Uno de nosotros (Lee), con Matthew P. A. Fisher, ahora en la Universidad de California en Santa Cruz, extendió lógicamente la teoría para que explicase las demás mesetas del efecto Hall cuantizado, mucho más complicadas, como 2/5 y 3/7. Estos trabajos constituyeron la base de las investigaciones siguientes que los tres efectuamos para estudiar el efecto Hall cuántico bajo diversas condiciones.

Los electrones como bosones compuestos

La teoría de los bosones compuestos se basa en una equivalencia matemática entre los electrones que se mueven en dos dimensiones y un conjunto de bosones que lleve un haz de flujo magnético ficticio. Para que el bosón compuesto reproduzca la estadística de Fermi del electrón, cada bosón ha de llevar un número impar de cuantos de flujo magnético ficticio.

Puede que un ejemplo explique mejor los efectos de un flujo magnético ficticio. Consideremos uno de los factores de relleno mágicos para los que aparece una meseta en el voltaje de Hall, 1/3, por ejemplo. Este factor de relleno quiere decir que hay tres cuantos de flujo magnético real por electrón. No veamos cada electrón como un fermión, sino como un bosón compuesto ligado a tres cuantos de flujo ficticio. Apuntemos ahora esos tres cuantos de flujo en la dirección opuesta al campo magnético externo. El flujo neto que ven los bosones es la suma de los flujos real e imaginario; como el ficticio lo hemos apuntado de forma que anule el real, el bosón no ve flujo magnético alguno. Se sabe que los bosones, a temperaturas bajas y sin campo magnético, superconducen, y por ello esperamos que los bosones compuestos fríos con un factor de relleno de 1/3 hagan lo mismo.

¿Por qué la superconductividad de los bosones compuestos ha de suponer la conducción perfecta en la dirección de corriente y una conductancia de Hall cuantizada en la dirección perpendicular? Lo primero es fácil. Como los bosones compuestos son superconductores, no hace falta voltaje para mantener la corriente; hay, pues, conducción perfecta.

Lo segundo es más sutil. Recuérdese que cada bosón compuesto que fluye lleva un número impar de cuantos de flujo magnético ficticio. Por tanto, si los bosones fluyen, también fluirán con ellos los cuantos de flujo magnético ficticio. Pero el movimiento de un flujo magnético (hasta de uno ficticio) genera un voltaje eléctrico perpendicular al flujo (esta propiedad es la ley de Faraday de la inducción electromagnética). Además, este voltaje lateral es proporcional a la cantidad total de flujo ficticio que atraviese la muestra cada segundo. En consecuencia, para un factor de relleno de 1/3, la corriente originada por

el flujo magnético es tres veces la corriente eléctrica, lo que explica que la conductancia de Hall sea 1/3 del cuanto de conductancia.

Desde este punto de vista, la única diferencia entre los distintos factores de relleno mágicos —sean 1, 1/3 o 1/5— estriba en el número de cuantos de flujo magnético ficticio que lleve cada bosón compuesto. Además, las conductancias de Hall cuantizadas (1, 1/3, 2/5..., multiplicadas por e^2/h) dependen sólo de la razón entre la carga y el flujo del bosón compuesto, y no de las características del material donde se las observe.

El modelo basado en los bosones compuestos explica también por qué la conductancia de Hall no cambia, aun cuando el factor de relleno se desvíe un poco de un valor mágico. Piénsese en una situación en la que el factor de relleno sea un poco mayor de 1/3. En ese caso, el flujo ficticio anula el real sólo en parte, y los bosones compuestos experimentan un pequeño campo magnético neto. Pero el bosón compuesto superconductor, como un superconductor real, tolera un campo magnético pequeño. En consecuencia, la conductancia de Hall no cambia en una pequeña ventana alrededor del factor de relleno 1/3.

La analogía entre la superconductividad y el efecto Hall cuántico va mucho más lejos. Por ejemplo, la característica que tienen los superconductores de repeler los campos magnéticos se convierte en la resistencia de los electrones que exhiben el efecto Hall cuántico a cualquier cambio del área total que ocupan (se dice que el efecto Hall cuántico es incompresible). Otros aspectos más oscuros de la superconductividad tienen también correspondientes directos en el efecto Hall cuántico.

Mapa de planilandia

Hemos estudiado el efecto Hall cuántico mediante la teoría del bosón compuesto para una gran variedad de circunstancias. El resultado de un trabajo de este tipo se representa en un diagrama de fases; así es como suelen resumirse las reacciones de un material en distintas condiciones. Por ejemplo, a diferentes presiones y temperaturas, un conjunto de moléculas de agua puede convertirse en líquido, en hielo o en vapor. Se puede elaborar un diagrama que represente estas fases y que indique el estado físico de las moléculas de agua a lo largo de un intervalo de presiones y temperaturas.

Los parámetros del diagrama de fases de los electrones en planilandia no son la presión y la temperatura, sino la intensidad del campo magnético y el grado de imperfección, o desorden, de los cristales semiconductores que atrapan los electrones. Lo obtuvimos a partir del diagrama de fases de los superconductores, conocido de antemano; la representación gráfica de la información que se saca de éste produce una hermosa estructura anidada [*véase la figura 5*].

La teoría del efecto Hall cuántico basada en los bosones compuestos condujo además a la predicción de un estado inesperado en el que los electrones toman las propiedades de un aislante y un metal a la vez. Un experimento reciente, realizado por Hong-Wen Jiang y Kang-Lung Wang, de la Universidad de California en Los Angeles, y Scott T. Hannahs, de la Universidad estatal de Florida, ha confirmado la predicción de ese aislante de Hall. Cuando incrementaban el grado de imperfección de los semiconductores más allá de cierto punto, era necesario un voltaje muy grande para mantener la corriente. A medida que la temperatura se acercaba al cero absoluto, hacía falta más voltaje de forma constante. Estas son características de un aislante. Por el contrario, el voltaje de Hall seguía siendo independiente de la temperatura y aumentaba con la intensidad del campo magnético. Estas son características de un metal.

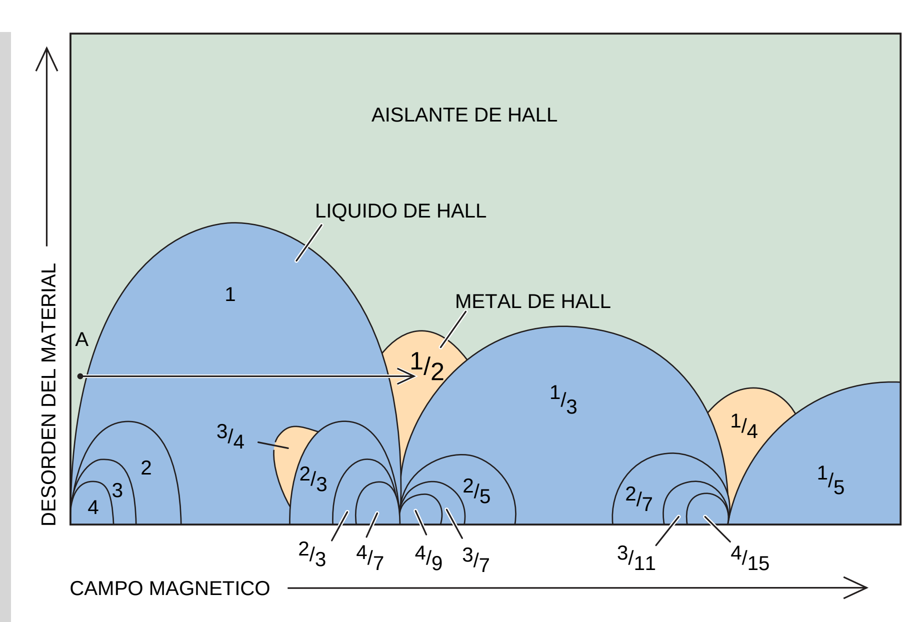
Los experimentos de, entre otros, Jiang, Tsui, Störmer, Loren N. Pfeiffer y Ken W. West —de los laboratorios Bell de la AT&T los tres últimos— han descubierto una sorpresa más, esta vez cerca del factor de relleno 1/2: los electrones actuaban en muy buena medida como si estuviesen en un metal ordinario y no en un campo magnético. Una de sus características distintivas era que la conductancia de Hall no estaba cuantizada y dependía linealmente del campo magnético.

Una interesante explicación de este metal de Hall —así es llamado— se basa en que se tome al electrón por un fermión compuesto. Un fermión compuesto se parece a un bosón compuesto salvo en que lleva un número par de cuantos de flujo magnético ficticio y, por ello, obedece la estadística de Fermi. Estas ideas, que en parte se fundan en una de Jainendra K. Jain, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, son obra de Read, Bertrand I. Halperin, de la Universidad de Harvard, Patrick A. Lee, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, e, independientemente, Vadim Kalmeyer, antes en el Centro de Investigación Almaden de IBM, y uno de nosotros (Zhang).

Lo bueno tanto de los bosones compuestos como de los fermiones compuestos es que, gracias a ellos,

Comparación de la superconductividad y el efecto Hall cuántico

SUPERCONDUCTIVIDAD	EFECTO HALL CUANTICO
Los portadores básicos de la carga son electrones emparejados (pares de Cooper).	Los portadores básicos de la carga son bosones compuestos
Conducción perfecta	Conducción perfecta en la dirección longitudinal
Persiste en los campos magnéticos y en los materiales con imperfecciones	Mesetas de Hall cuantizadas, cuyos valores se mantienen en un intervalo pequeño de intensidades del campo magnético
Los electrones expulsan los campos magnéticos débiles	Los electrones se resisten a que cambie su densidad en un campo magnético fijo, propiedad llamada incompresibilidad.
Cuantización del flujo (propiedad de los anillos superconductores, que deben encerrar un número entero de cuantos de flujo magnético)	Carga fraccionaria (la cuantización de la carga eléctrica en unidades que son fracciones de la carga del electrón)



5. LOS NUEVOS ESTADOS de la materia que exhiben los electrones en planilandia, mostrados en un diagrama de fases. Dados un campo magnético y un nivel de desorden determinados (*punto A*), los electrones actúan como un "aislante de Hall" (*verde*), que tiene características tanto aislantes como metálicas. Para campos magnéticos mayores, los electrones se convierten en un "líquido de Hall" (*azul*) —es decir, muestran el efecto Hall cuántico— o, si son mayores aún, en un "metal de Hall" (*anaranjado*). Los números indican los valores enteros y fraccionarios de la conductancia de Hall cuantizada.

el comportamiento de los electrones en planilandia, que parece extraño, se puede relacionar con el comportamiento bien conocido de ciertas partículas compuestas. Una pregunta que suele suscitarse es si éstas son reales o si, como los quarks de la física de altas energías, sólo son construcciones útiles que no cabe aislar ni estudiar individualmente. Este debate ha motivado bastantes investigaciones, pero no se han alcanzado aún resultados definitivos.

Dieciséis años después de su descubrimiento, el efecto Hall cuántico sigue siendo una de las áreas de investigación más apasionantes de la física de la materia condensada. Gracias a la rica variedad de estos fenómenos se han podido contrastar muchas ideas teóricas. Se ha formado un cuadro global, que unifica el conocimiento que se tiene de ellos y de otros fenómenos propios de los sistemas de materia condensada. Pese al progreso, siguen sin resolverse problemas críticos. Por ejemplo, falta mucho aún para conocer por completo el aislante de Hall y el metal de Hall. Tampoco se sabe del todo cómo encajan en el cuadro otras propiedades de los electrones, así el espín.

En un artículo sobre este tema que Halperin publicó en 1986 en *Investigación y Ciencia* señalaba que "la verdadera importancia del efecto Hall cuántico no radica, sin embargo, en ninguna de estas aplicaciones, sino en la perspectiva, completamente nueva, que los físicos han adquirido acerca de las peculiares propiedades de los sistemas de electrones sometidos a campos magnéticos intensos y acerca de las regularidades encubiertas derivadas de las leyes matemáticas de la mecánica cuántica. No menos importante: este efecto nos recuerda que la naturaleza puede encerrar otros sorprendentes estados de la materia de los que no tenemos ni sospecha". Diez años después, ya se han hallado algunos estados así. Esperamos descubrir más.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

APLICACIONES DEL EFECTO HALL CUÁNTICO. Bertrand I. Halperin, en *Investigación y Ciencia*, págs. 30-39, junio de 1986.

ALONES. Frank Wilczek, en *Investigación y Ciencia*, págs. 14-22, julio de 1991.

THE CHERN-SIMONS-LANDAU-GINZBURG THEORY OF THE FRACTIONAL QUANTUM HALL EFFECT. Shou-Cheng Zhang, en *International Journal of Modern Physics B*, vol. 6, n.º 1, págs. 25-58; enero de 1992.

GLOBAL PHASE DIAGRAM IN THE QUANTUM HALL EFFECT. S. Kivelson, D.-H. Lee y S.-C. Zhang, en *Physical Review B*, vol. 46, n.º 4, páginas 2223-2238; 15 de julio, 1992.

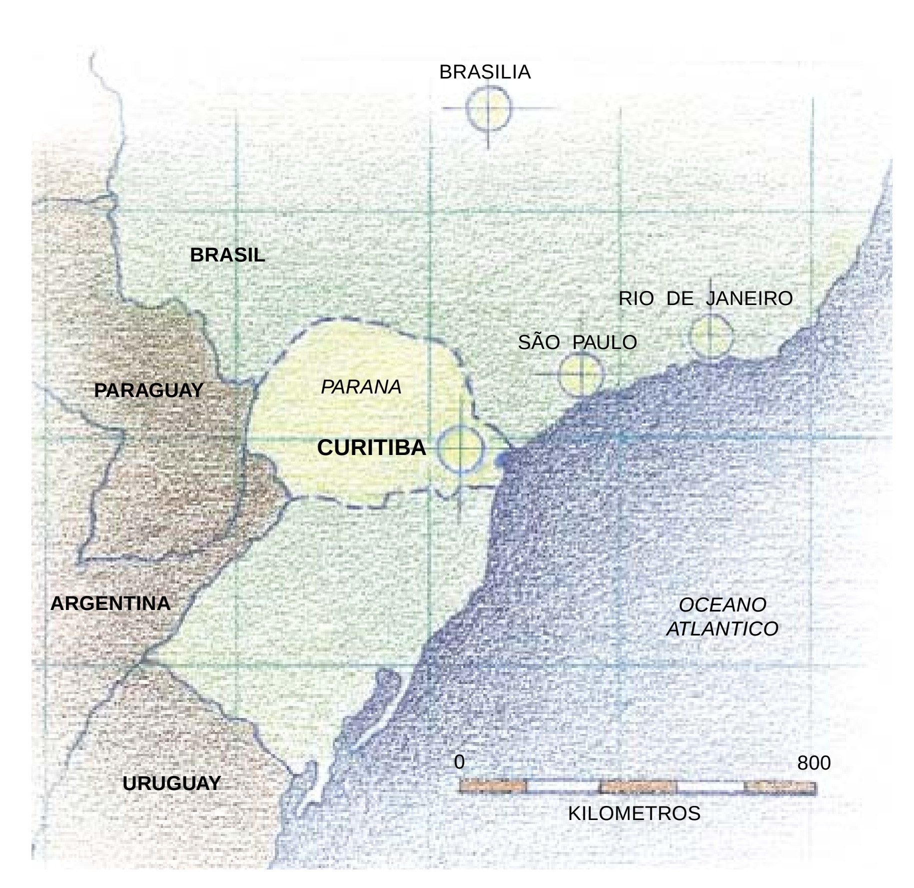
Planificación urbana de Curitiba

Una ciudad brasileña desafía la doctrina urbanística al uso y se apoya en técnicas sencillas para mejorar su calidad de vida

Jonas Rabinovitch y Josef Leitman

A finales del siglo pasado nadie, ni siquiera el fantasioso Julio Verne, podía imaginar que una ciudad albergara más de un millón de habitantes. Pero hacia el 2010 más de 500 aglomeraciones urbanas rebasarán esa barrera y 26 de ellas pasarán de los 10 millones. Por primera vez en la historia vive más gente en las ciudades que en las zonas rurales.

El crecimiento de casi todas las ciudades modernas se ha plegado a las exigencias de la circulación rodada. El transporte privado ha impuesto un trazado físico, ha determinado el emplazamiento de viviendas, comercios e industrias, y ha condicionado las relaciones humanas. Autovías, aparcamientos y estudios de tráfico son piezas básicas de la planificación urbana, que intenta controlar la naturaleza dentro de los límites de la ciudad, a menudo a expensas del propio entorno. Lo tradicional es recurrir a soluciones técnicas para re-





1. LOS PARQUES QUE BORDEAN LAGOS cumplen múltiples funciones en Curitiba, capital del estado de Paraná en el suroeste del Brasil: proporcionan espacios verdes, forman parte de la red metropolitana para bicicletas y ayudan a controlar las inundaciones que antaño asolaban la ciudad. Los lagos artificiales, creados en los setenta, facilitan el drenaje y embalsan el exceso de agua de lluvia, impidiendo las inundaciones de las zonas bajas.

solver problemas muy diversos, como la contaminación o el tratamiento de residuos.

Curitiba, capital del estado de Paraná en el sureste del Brasil, ha emprendido un camino diferente. Su expansión es una de las más notables en un país de fuerte crecimiento urbano: de 300.000 habitantes en 1950 ha pasado a más de 2 millones en 1990. Durante ese período ha cambiado radicalmente su economía, antaño dedicada a la manipulación de los productos agrarios y hoy centrada en la industria y el comercio. Tales cambios acarrean fatalmente secuelas de paro, chabolismo, congestión y degradación ambiental. No ha sido ése el sino de Curitiba. Pese a la pobreza y el bajo nivel de renta propios de su región, ha logrado frenar la contaminación, su índice de criminalidad ha descendido y sus ciudadanos han mejorado de nivel educativo.

¿Por qué Curitiba ha triunfado donde otras ciudades fracasaron? Las sucesivas administraciones municipales convirtieron a Curitiba en un laboratorio viviente para experimentar un estilo de desarrollo urbano que daba preferencia al transporte público sobre el privado, respetaba el entorno, buscaba soluciones adecuadas en vez de técnicas espectaculares y prefería la participación innovadora de los ciudadanos a las grandes planificaciones. Este enfoque, progresivamente introducido en las postrimerías de los años sesenta, fue adoptado en 1971







2. LA CALLE 24-HORAS mantiene viva el área urbana central de Curitiba. La ciudad ha reglamentado también los emplazamientos de bancos, compañías de seguros y otras actividades de horario normal (de nueve a cinco) para impedir que el distrito se desertice pasadas las horas de trabajo.

por un alcalde soñador, el arquitecto y proyectista Jaime Lerner. Los últimos 25 años han demostrado que la decisión fue correcta: el alcalde actual, Rafael Greca, respalda la política de sus predecesores y la mantiene.

Uno de los primeros logros de Curitiba fue el control de las persistentes inundaciones que asolaban el centro de la ciudad durante los años cincuenta y primeros sesenta. El problema estaba agravado por la construcción de casas y otras estructuras en las orillas de ríos y cursos de agua. Los ingenieros los habían cubierto y convertido en canales subterráneos de dificultoso drenaje, lo que obligaba a excavar nuevos canales de drenaje a un costo enorme. Al mismo tiempo, los promotores construían nuevas zonas residenciales y distritos industriales en la periferia sin atender debidamente a los drenajes.

JONAS RABINOVITCH y JOSEF LEITMAN son expertos en urbanismo que trabajan, respectivamente, para las Naciones Unidas y el Banco Mundial. Rabinovitch se graduó en arquitectura y urbanismo en la Universidad Federal de Río de Janeiro, formación que completó en la Universidad de Londres. Leitman se doctoró en planificación urbana y regional por la Universidad de California en Berkeley. Completó estudios en Harvard.

A partir de 1966 la ciudad reservó terrenos para fines de drenaje y prohibió la construcción en ciertas zonas bajas. En 1975 se promulgó una legislación restrictiva para proteger el sistema de drenaje natural que aún subsistía. Para utilizar esas zonas, Curitiba convirtió en parques muchas riberas fluviales y construyó lagos artificiales en prevención de las inundaciones. Se plantaron árboles con profusión en los parques y se transformaron fábricas abandonadas y otros edificios ribereños en centros deportivos y de recreo. Los carriles para autobús y bicicletas integran los parques en el sistema de transporte de la ciudad.

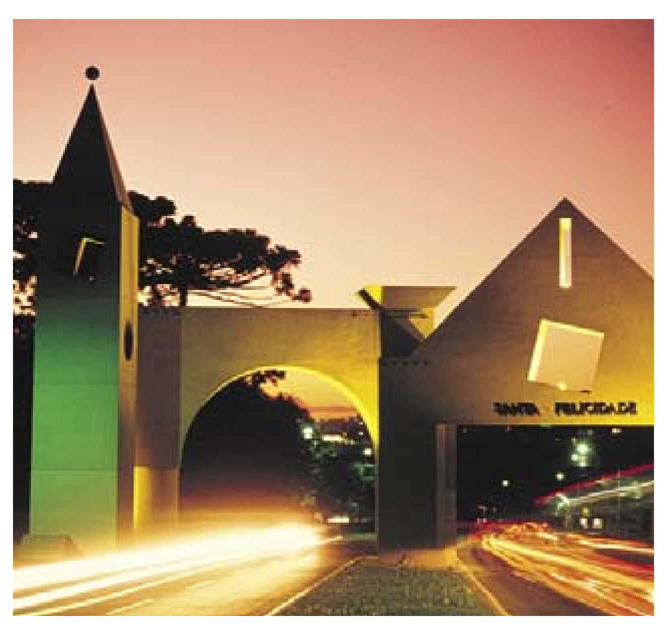
Este “diseño con la naturaleza” ha resuelto varios problemas a un tiempo. Las inundaciones ya no son una amenaza, pero se sigue invirtiendo en el control de las aguas. Quizá sea todavía más importante el haber dedicado a parques terrenos aluviales que para otro uso no serían seguros. Esto ha permitido aumentar la extensión de espacio verde per cápita en Curitiba desde medio metro cuadrado en 1970 hasta los 50 metros cuadrados de hoy día (y eso en una época de rápido crecimiento demográfico).

Tal vez la diferencia más acusada entre Curitiba y otras ciudades sea que no existe un reticulado central al que afluyen autopistas de intenso tráfico. Casi todas las ciudades crecen de una manera concéntrica, incorporando nuevos distritos en la periferia y aumentando cada vez más la densidad de su núcleo comercial y empresarial. La congestión es inevitable, sobre todo si las personas que van a trabajar al centro desde la periferia utilizan su coche privado. En los años setenta las autoridades de Curitiba optaron por fomentar el crecimiento a lo largo de ejes estructurales señalados, lo que permitía la ampliación de la urbe al tiempo que se desarrollaba un tránsito masivo que facilitaba los desplazamientos entre tiendas, oficinas y viviendas. La red viaria y el sistema de transporte público de Curitiba son probablemente los factores que más han influido en la configuración de la ciudad.

Cada uno de los cinco ejes principales del crecimiento urbano consta de tres vías paralelas. La vía central contiene dos carriles rápidos para autobuses, con carriles laterales de uso local. A una manzana de distancia a cada lado discurren calles de sentido único de alta capacidad, una para entrar y otra para salir del núcleo central. La legislación vigente ha fomentado una densa ocupación del suelo, unida a servicios y comercios en las zonas adyacentes a cada eje.

La ciudad añadió a esta configuración un sistema de transporte público por autobuses concebido con criterios de comodidad y rapidez. Las líneas de autobús entre distritos y las tribu-





3. EL CENTRO HISTORICO de Curitiba goza de una protección especial para preservar los edificios antiguos, en la que se incluyen incentivos para construir en otros lugares. Muchas de sus calles se han peatonalizado, reduciendo la polución y realzando el sentido de vecindad. Las puertas conmemorativas delimitan zonas de la ciudad donde en otro tiempo habitaron grupos inmigrantes (a la derecha, la entrada al antiguo barrio italiano).

tarias complementan las líneas exprés que recorren los ejes estructurales. En las cabeceras distantes de las cinco líneas exprés se sitúan unos grandes terminales de transbordo que permiten pasar de una línea a otra, como sucede en otros terminales de tamaño medio colocados aproximadamente a cada dos kilómetros sobre las líneas exprés. Los pasajeros pueden cambiar de las líneas exprés a las locales e interdistrito sin pagar un nuevo billete.

Los detalles del sistema responden, como la estructura general, a objetivos de velocidad y sencillez. En unas paradas especiales elevadas, de forma tubular, los pasajeros pagan el billete por adelantado (como en una estación de metro) y acceden con rapidez al autobús a través de dos puertas muy anchas. Esta combinación de factores ha reducido en un tercio el tiempo total de viaje. Además, para aumentar la capacidad de estas líneas exprés, en Curitiba se utilizan autobuses articulados de dos o tres secciones.

La elección de técnica de transporte no ha estado dictada únicamente por la eficacia sino también por la simple economía; la construcción de una red de metro subterránea hubiera costado unos 9000 millones de pesetas por kilómetro, mientras que el coste de la red exprés de autobuses fue de unos 25 millones por kilómetro, con las paradas tubulares incluidas. La operación y el mantenimiento de los autobuses eran también tareas que podía realizar el sector privado. Son en efecto compañías privadas las que se encargan de todo el tráfico de masas, siguiendo las orientaciones y parámetros establecidos por la administración municipal. A las compañías de autobuses se las paga por el número de kilómetros que atienden y no por el número de pasajeros que transportan, lo que permite una distribución equilibrada de las líneas de autobús y elimina la competencia destructiva.

El resultado es que el residente medio de baja renta en Curitiba gasta en transporte sólo un 10 por ciento de sus ingresos, lo que es relativamente poco en Brasil. Aunque hay más de 500.000 vehículos privados en la ciudad (más coches per cápita que en cualquiera otra urbe brasileña, excepto Brasilia), las tres cuartas par-



4. EL BULEVAR principal de Curitiba, dedicado al uso peatonal, acoge la celebración semanal de una sesión de pintura infantil. La ceremonia comenzó de un modo pragmático en 1972; cuando los conductores desafiaron la prohibición de tráfico y amenazaron con invadir la calle como de costumbre, los trabajadores municipales les cortaron el paso desplegando enormes hojas de papel e invitando a los niños a pintar acuarelas.

SISTEMA DE TRANSITO EN CURITIBA

ESTACIONES DE BUS EXPRES

CENTRO URBANO

LINEAS EXPRES

LINEAS INTERDISTRITO

LINEAS DIRECTAS

LINEAS TRIBUTARIAS

LINEAS DE TRABAJADORES

5. LAS LINEAS de autobús han crecido con la ciudad. Las líneas exprés definen ejes estructurales radiales, y las líneas interdistrito y locales unen los distintos radios. Cada línea la atiende un autobús del tamaño apropiado, desde los minibuses de tráfico local para 40 personas hasta los gigantes biarticulados de 270 pasajeros utilizados en las líneas exprés.

tes de la fuerza laboral —más de 1,3 millones de pasajeros al día— toman el autobús. El consumo individual de combustible es un 25 % inferior al de ciudades brasileñas comparables, y la contaminación ambiental de Curitiba es una de las más bajas del país. Aunque los autobuses gastan combustible diésel, el número de viajes de automóvil que ahorran compensa sobradamente sus emisiones.



Además de estas ventajas, la ciudad tiene un sistema de transporte público que se autofinancia, en vez de endeudarse con los pagos de las subvenciones a la construcción y explotación que entraña un sistema de metro urbano. Los ahorros se han invertido en otras áreas. Ni siquiera los autobuses viejos se desechan, sino que sirven para transportar gente a los parques o para escuelas móviles.

La ejecución del sistema de transporte público permitió, asimismo, el desarrollo de un programa de viviendas de renta baja que proporcionó unas 40.000 nuevas unidades. Antes de llevar a efecto el sistema, la alcaldía compró y reservó terrenos para viviendas baratas cerca de la Ciudad Industrial de Curitiba, un distrito fabril inaugurado en 1972, a ocho kilómetros al oeste del centro urbano. Dado que el valor del suelo viene determinado por su proximidad a los transportes y otras prestaciones, estas “reservas de suelo” hicieron posible que los pobres consiguieran casas con fácil acceso al trabajo en zonas donde los precios de las viviendas habrían sido inasequibles. En la Ciudad Industrial de Curitiba radican ahora 415 empresas que directa o indirectamente generan la quinta parte de todos los puestos de trabajo de la urbe; no están allí permitidas las industrias contaminantes.

6. LA RED DE TRANSPORTE incluye carriles para bicis integrados en la red viaria y de autobuses, para mayor eficacia. Los carriles bici también enlazan los distintos parques de la ciudad.

Los gestores municipales de Curitiba han aprendido que tan importantes como un buen plan son unos acertados sistemas e incentivos. El plan maestro de la ciudad ayudó a diseñar las grandes líneas que guiarían los desarrollos futuros. Pero las ideas se hicieron realidad a través de unos sistemas e incentivos apropiados, no por la ciega ejecución de unas normas rígidas.

Una de las innovaciones introducidas es el servicio de información pública sobre los terrenos. El ayuntamiento suministra información inmediata sobre las posibilidades de construcción en cualquier solar de la ciudad. Todo el que desee obtener

Diseño integrado para la red de autobuses





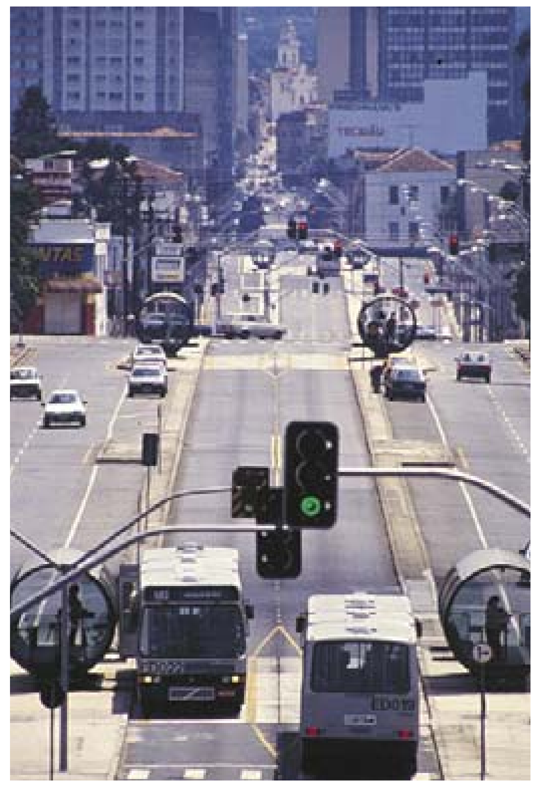
El sistema de autobuses exprés de Curitiba constituye una entidad indivisible, no un agregado de autobuses, paradas y calzadas viarias. Por ello tiene mucho en común con la red de metro que la ciudad podría haber construido desembolsando una cantidad astronómica de dinero. Las paradas tubulares elevadas de Curitiba (*arriba*) permiten que los pasajeros paguen al entrar en ellas, no en el autobús, con lo que se acorta el tiempo de parada y el rendimiento del autobús es óptimo.

En la parada hay un mecanismo elevador de sillas de ruedas (*derecha, arriba*). Se aligera así la carga del autobús al no incorporar el sistema elevador, muy expuesto a averías, como también lo son los que ponen los escalones al alcance de las personas mayores. También se abrevia el tiempo de parada, pues los pasajeros discapacitados se sitúan en la altura apropiada antes de que llegue el autobús.

Los autobuses circulan por un carril exclusivo (*derecha*). Este derecho de paso reduce la duración del recorrido. De este modo, construyendo calzadas de hormigón y asfalto en la superficie en lugar de enterrar raíles de acero, se han alcanzado la mayoría de los objetivos que persigue una red de metro subterráneo por menos del 5 % del coste inicial que ésta habría supuesto.

Curitiba invierte parte de los ahorros conseguidos en mantener los 2000 autobuses de su flota —pertenecientes a 10 compañías privadas contratadas por el municipio— entre los más nuevos del mundo. La edad media de un autobús es sólo de tres años. La ciudad paga mensualmente el 1 % del valor del autobús a sus propietarios, y a los 10 años se convierte en titular de los vehículos retirados y los reacondiciona como autobuses de parques o escuelas móviles.

Se retribuye a los transportistas conforme a la longitud de las líneas que atienden, no por el número de pasajeros que transportan, lo cual incentiva la prestación del servicio y eleva su utilización (*derecha, abajo*). Más de la cuarta parte de los propietarios de automóviles de Curitiba van en autobús al trabajo. En respuesta al crecimiento de la demanda, la ciudad ha aumentado la capacidad de su red utilizando autobuses largos articulados (comparables a los trenes de varios vagones del metro). El autobús biarticulado, en servicio desde 1992, comprende tres secciones unidas por articulaciones que le permiten doblar las esquinas. A plena capacidad, estos autobuses transportan 270 pasajeros, más de tres veces lo que un autobús ordinario.













7. EL RECICLADO en Curitiba toma diversas formas. Las familias clasifican su basura para facilitar la recuperación del vidrio, metales y plásticos (*izquierda, arriba*). Además, los autobuses viejos se utilizan por segunda o tercera vez para el transporte gratuito a los parques urbanos (*izquierda, centro*) o como oficinas o escuelas móviles (*izquierda, abajo*). Hasta las viejas torres del tendido eléctrico se recuperan para estructuras de parques u oficinas públicas, como la Universidad Libre del Medio Ambiente (*arriba*).

o renovar una licencia de actividad comercial debe aportar información para evaluar las repercusiones sobre el tráfico, las necesidades de infraestructura y de aparcamientos y los aspectos de índole municipal. El acceso fácil a tal información previene la especulación del suelo; también es esencial a los efectos presupuestarios ya que los impuestos sobre los bienes son la principal fuente de ingresos del municipio.

Los incentivos han tenido importancia para reforzar el comportamiento positivo. Los propietarios de terrenos en el distrito histórico de la ciudad pueden transferir a otras zonas el potencial de edificación que encierran sus solares, norma que ha servido para preservar los edificios históricos compensando equitativamente a sus propietarios. Además, las empresas radicadas en determinadas zonas urbanas pueden "comprar" el permiso para edificar dos plantas por encima del límite legal. El pago puede hacerse en efectivo o en terrenos que la ciudad utiliza luego para financiar viviendas de baja renta.

Incentivos y sistemas estimulan también el desarrollo personal. La Universidad Libre del Medio Ambiente ofrece cursillos gratuitos para constructores, supervisores de obras, comerciantes y otros, en los que se enseñan las implicaciones medioambientales de las rutinas diarias hasta en los trabajos más comunes. Estos cursos, impartidos por gentes que han completado un programa de formación adecuado, son requisito obligado para obtener la licen-





8. LOS BARRIOS POBRES son inevitable secuela de las ciudades que crecen muy aprisa. El programa de compra de residuos en Curitiba paga en bonos de autobús o alimentos a unas 40.000 familias la basura que recogen en zonas a las que no llegan los servicios municipales de limpieza. Ello mitiga al menos las condiciones insalubres que usualmente prevalecen (la fotografía de la izquierda se tomó antes de iniciar las compras de residuos). En virtud de un plan similar se entregan cuadernos a los escolares pobres.

cia en ciertos trabajos como la conducción de taxis, pero muchas personas los siguen voluntariamente.

La ciudad financia varios programas importantes para la infancia, respaldando con dinero las declaraciones, a menudo enfáticas y huecas, de los ayuntamientos sobre la importancia de la próxima generación. El programa de reparto de periódicos ofrece trabajo a tiempo parcial a escolares de familias con escasos ingresos; los centros municipales de asistencia diurna sirven cuatro comidas al día a unos 12.000 niños, y el programa SOS Infantil facilita un número telefónico especial para llamadas urgentes relativas a niños expuestos a cualquier peligro.



9. EL JARDIN BOTANICO fue en otros tiempos un vertedero de la ciudad. Además de ofrecer espacio para recreo, sirve como centro de investigación para estudiar los compuestos vegetales.

Curitiba ha rechazado el enfoque al uso de buscar en la alta técnica el remedio de las calamidades urbanas. Suelen afirmar los urbanistas que las ciudades con más de un millón de habitantes han de tener metro subterráneo para evitar congestiones de tráfico. Otro dogma muy extendido es que las ciudades que generen más de 1000 toneladas de residuos sólidos al día necesitan costosas plantas mecánicas de separación de basuras. Pues bien, Curitiba carece de lo uno y de lo otro.

La ciudad ha encarado el problema de los residuos sólidos desde un doble punto de vista: la generación y la recogida. Los ciudadanos reciclan al día una cantidad de papel equivalente a casi 1200 árboles. La campaña "basura que no es basura" ha movilizado al 70 % de las familias para clasificar los materiales reciclables que han de recogerse. El programa "compra de basura", concebido para zonas de baja renta, ayuda a limpiar lugares que son difíciles de alcanzar por el sistema habitual de recogida de basura. Las familias pobres pueden cambiar bolsas llenas de basura por bonos de autobús, paquetes de comida extra y cuadernos escolares para los niños. Más de 34.000 familias de 62 barrios pobres han cambiado unas 11.000 toneladas de basura por casi un millón de bonos de autobús y 1200 toneladas de alimentos. En los tres últimos años los alumnos de más de 100 escuelas han cambiado unas 200 toneladas de basura por cerca de dos millones de cuadernos. Otra iniciativa, la de "todo limpio", contrata temporalmente a jubilados y desempleados para limpiar zonas específicas de la ciudad donde se han acumulado los desechos.

Estas innovaciones, que se apoyan en la participación pública y en el trabajo intenso más que en la mecanización y en las grandes inversiones de capital, han logrado reducir el coste y elevar la eficacia del sistema de tratamiento de residuos sólidos en la ciudad. Al mismo tiempo, han preservado los recursos, proporcionado empleo y embellecido la urbe.

Ninguna otra ciudad reúne una combinación de condiciones geográficas, económicas y políticas exactamente igual que Curitiba. No obstante, sus logros pueden servir de lección de planificación urbana, lo mismo en países industrializados que del Tercer Mundo.

Quizá la principal enseñanza radique en que debe concederse prioridad al transporte público sobre el privado, a los peatones frente a los vehículos. Los carriles para bicicletas y las zonas peatonales han de integrarse en la red viaria y el sistema público de transporte. Mientras que en otros lugares los programas de construcción intensiva de carreteras han generado —paradójicamente— una congestión todavía mayor, la reducción de las necesidades de motorización en Curitiba ha hecho disminuir el empleo privado del coche y reducido la contaminación.

En Curitiba se ha comprobado que las soluciones de los problemas urbanos no son específicas y aisladas; se entrecruzan. Todo plan debe contar con la participación de empresarios, organizaciones no gubernamentales, oficinas municipales, empresas de servicios públicos, asociaciones de vecinos, comunidades e individuos. Las ideas creativas y con gran contenido de mano de obra —sobre todo allá donde el paro constituya un problema— pueden a menudo sustituir a las macroinversiones en técnica.

Hemos descubierto que las ciudades pueden extraer recursos de lo que tradicionalmente son fuentes de problemas. Por ejemplo, el transporte público, los residuos sólidos y el paro son problemas clásicos pero encierran la capacidad de generar nuevos recursos, como ha ocurrido en Curitiba.

Otras ciudades comienzan a aprender estas lecciones. En Brasil y el resto de Iberoamérica son ya familiares las calles peatonales que se iniciaran en Curitiba. Ciudad del Cabo ha desarrollado una nueva configuración de su área metropolitana basada explícitamente en el sistema de ejes estructurales de Curitiba. Han visitado —y alabado— esta ciudad autoridades y técnicos de Nueva York, Toronto, Montreal, París, Lyon, Moscú, Praga, Santiago de Chile, Buenos Aires y Lagos.

Cuando estos planificadores vuelven a sus países con las experiencias de Curitiba, llegan convencidos de un principio esencial: el momento presente es único. En vez de intentar revitalizar centros urbanos cuya degradación se inicia, tanto en las grandes ciudades como en las que empiezan a crecer, pueden ya abordarse los problemas sin esperar a planes de reestructuración total ni aproximarse al colapso fiscal.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ENVIRONMENTAL INNOVATION AND MANAGEMENT IN CURITIBA, BRAZIL. Jonas Rabinovitch y Josef Leitman. United Nations Development Program, Habitat and World Bank. Urban Management Program, Working Paper Series n.º 1; junio de 1993.

JANE'S URBAN TRANSPORT SYSTEMS. Dirigido por Chris Bushell. Jane's Information Group, 1995.

A SUSTAINABLE URBAN TRANSPORTATION SYSTEM: THE "SURFACE METRO" IN CURITIBA, BRAZIL. J. Rabinovitch y J. Hoehn. Environmental and Natural Resources Policy and Training Project, Working Paper n.º 19; mayo de 1995.

Información vital

Tim Beardsley

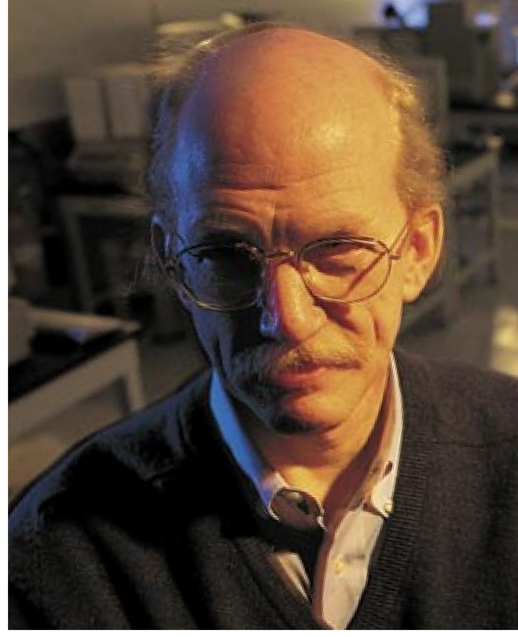
A finales de este año, si la empresa Myriad Genetics consigue su propósito, miles de mujeres sanas recibirán dos malas noticias. La primera, que un familiar cercano, quizás una hermana, padece cáncer de mama. La segunda, que a ese familiar su médico le habrá dicho que el cáncer lo ha producido, casi con toda probabilidad, una mutación que sus consanguíneos también pueden tener. El doctor sugerirá a la paciente que comunique a sus familiares femeninos cercanos la conveniencia de que se sometan a una prueba para detectar dicha mutación. Las mujeres que la porten deberán considerar la posibilidad de someterse a una doble mastectomía profiláctica, ya que es muy probable que ellas desarrollen cáncer de mama. ¿Cuál es esa probabilidad? Aunque difícil de precisar, pues tales mutaciones aún no se han estudiado a fondo, la probabilidad podría elevarse hasta el 85 por ciento.

Muchísima gente habrá de enfrentarse al dilema planteado por las pruebas para detectar genes asociados con enfermedades graves. *BRCA1*, el gen del cáncer de mama, cuyo examen a gran escala se dispone Myriad abordar este mismo año, constituye uno más de entre las decenas que los médicos consideran necesarios someter a las pruebas de detección de mutaciones. Este tipo de pruebas son, en mayor o menor grado, uno de los frutos indirectos del Proyecto Genoma Humano, un audaz programa federal estadounidense de 375.000 millones de pesetas y 15 años de duración, cuyo objetivo es analizar molecularmente la herencia genética humana.

Si bien el proyecto comenzó formalmente hace sólo unos cinco años y medio, los progresos registrados ya superan las mejores expectativas. Francis S. Collins, director del norteamericano Centro Nacional de Investigaciones sobre el Genoma Humano (NCHGR), del Instituto Nacional de la Salud, opina que el trabajo puede estar terminado "quizá dos años antes de lo previsto", hacia el 2003. Las técnicas desarrolladas al abrigo de este enorme desafío han permitido cuadruplicar la tasa de descubrimientos de genes humanos relacionados con enfermedades, según una estimación del NCHGR. No hay semana, podría decirse, sin que se caracterice un nuevo segmento de ADN de interés clínico. Un ritmo que seguirá acelerándose. Cuando se aproxime el final, las previsiones son que cada hora se secuencie un nuevo gen, es decir, se determine el orden de las subunidades químicas que lo forman.

El proyecto respondía a un objetivo: lograr el camino más seguro para luchar contra enfermedades de las cuales hace mucho tiempo se conocía su carácter hereditario y también contra otras, como el cáncer, que guardan una relación más sutil con los genes. Pero esa andadura hacia el nirvana genético será larga. Los primeros resultados de uno de los frutos más ansiosamente esperados, la terapia genética, han sido decepcionantes. Y al menos un biólogo implicado en este proyecto, Daniel W. Drell, del Departamento de Energía, prevé una "virulenta evolución legal" en el tema de





CENTRO DE SECUENCIACION DEL GENOMA (*arriba*), en la facultad de medicina de la Universidad de Washington, dirigido por Robert H. Waterston (*abajo*). Comenzará este año la secuenciación a gran escala de los cromosomas humanos (*derecha*).

El Proyecto Genoma Humano está generando un río de información que ayudará a descubrir los gérmenes ocultos de las enfermedades hereditarias. Podríamos así entrar en una nueva era de la medicina, aunque no vendrá exenta de riesgos desconocidos



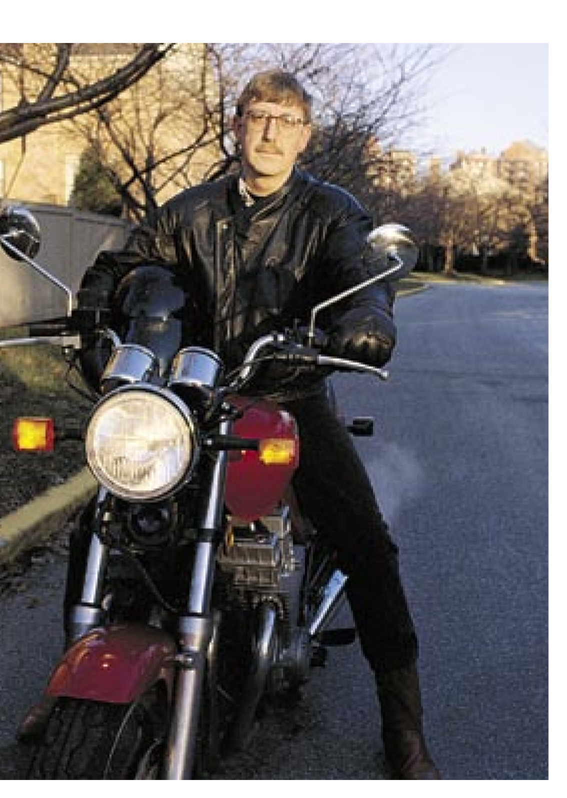
las patentes sobre genes, ya que las compañías tratan por todos los medios de ocultar aquellas secuencias de ADN que encierran valor comercial. La comercialización de este acervo común de nuestra especie ha disparado las protestas de los defensores de los derechos humanos, que ven en ello una afrenta a la naturaleza. Al propio tiempo, un eminente genético ha advertido que las terapias basadas en genes serán demasiado caras para pensar en un uso generalizado de las mismas.

Ya han empezado a aparecer los abusos relacionados con la nueva ciencia del genoma. Hay constancia de niños sometidos a pruebas de detección de ciertas enfermedades, a pesar de que los especialistas en consejo genético coinciden en que, para evitarles perjuicios, ellos deben quedar al margen de tales ensayos. Por otra parte, como el riesgo de contraer una determinada enfermedad suele ser causa de rechazo a la hora de conseguir un empleo o de contratar un seguro de enfermedad o vida, muchos pacientes, y sus hijos, empiezan a negarse a ser sometidos a pruebas genéticas, por beneficioso que pudiera resultarles desde una óptica médica. Otros acceden bajo un nombre falso.

Algunos líderes del proyecto genoma han reconocido desde el principio que la genética humana puede aplicarse con fines legítimos y otros menos legítimos. Por ello, han insistido en la necesidad de invertir el dinero preciso en el estudio de los aspectos éticos, legales y sociales. Sin embargo, los avances se producen a tal velocidad, que casi superan a los intentos, por parte de las sociedades profesionales y de los entes legislativos, de orientar el uso de las nuevas técnicas.

En 1990, los planificadores estimaban que, en dilucidar la secuencia de subunidades químicas, o bases, de todo el genoma, se emplearían varias decenas de miles de laborantes-año (toda la secuencia escrita, utilizando un carácter para cada base, ocuparía unas 390.000 páginas de *Investigación y Ciencia*, sin ilustraciones). Además, como paso previo a la secuenciación, que revelaría finalmente la posible función de cada uno de los casi 100.000 genes humanos, y su localización en los cromosomas, habría primero que elaborar una suerte de "plano de situación" genético.

Los investigadores necesitaban un mapa genético. A grandes rasgos, un mapa genético es un diagrama que describe las relaciones cromosómicas de miles de secuencias "marcadoras" conocidas, en función de cómo éstas se separan y recombinan durante las sucesivas generaciones humanas. Se requerían también mapas físicos. En éstos, se describe la ordenación, a lo largo de un cromosoma, de multitud de sitios "señalados" por secuencias reconocibles. Con el mapa genético, los investigadores pueden comparar el patrón hereditario de una característica genética determinada con el que presenta alguna de las secuencias "marcadoras". De ese cotejo se infiere el lugar donde se encuentra el gen responsable de la característica genética en cuestión. Los computadores se encargan después de ir situando los rimeros de datos que emergen de las máquinas de secuenciación sobre los mapas físicos. Con los dos tipos de mapas es posible encontrar rápidamente el lugar donde se encuentran los genes asociados con enfermedades.



FRANCIS S. COLLINS, director del Centro Nacional de Investigaciones sobre el Genoma Humano.

Aunque el Congreso de los Estados Unidos ha dedicado menos de los 25.000 millones de pesetas por año solicitados por el proyecto genoma, las fructíferas colaboraciones internacionales han dado un empujón considerable a los trabajos. A finales de 1994 se había perfilado ya un buen mapa genético que abarcaba el genoma entero, y existen ya mapas físicos de una calidad excelente que cubren el 95 por ciento del genoma. Este año se espera que esté ya disponible un mapa físico con marcadores espaciados cada 100.000 bases, la distancia ideal. Todo está, pues, a punto para comenzar la secuenciación a gran escala.

Tras los esfuerzos realizados en la secuenciación de genomas de otros organismos, se ha aprendido a acelerar el proceso y abaratar los costes. Hay en desarrollo nuevas técnicas de secuenciación. Collins opina, sin embargo, que no serán necesarios enfoques radicalmente novedosos para conseguir que en el 2005 tengamos la secuencia del genoma humano con un 99,9 por ciento de fiabilidad. Las mejoras en eficacia observadas en los dos últimos años le han convencido de que la técnica actual es adecuada para realizar el trabajo.

El Departamento norteamericano de Energía, que financia una parte importante del proyecto genoma, tiene en marcha varias operaciones de secuenciación a escala "piloto". El primer gran programa de secuenciación se inauguró a finales del año pasado en el Centro Sanger de Gran Bretaña, financiado por la Wellcome Trust. Por lo que concierne a los Estados Unidos, el grueso del trabajo corre a cargo del centro de secuenciación de Robert H. Waterston, en la Universidad de Washington.

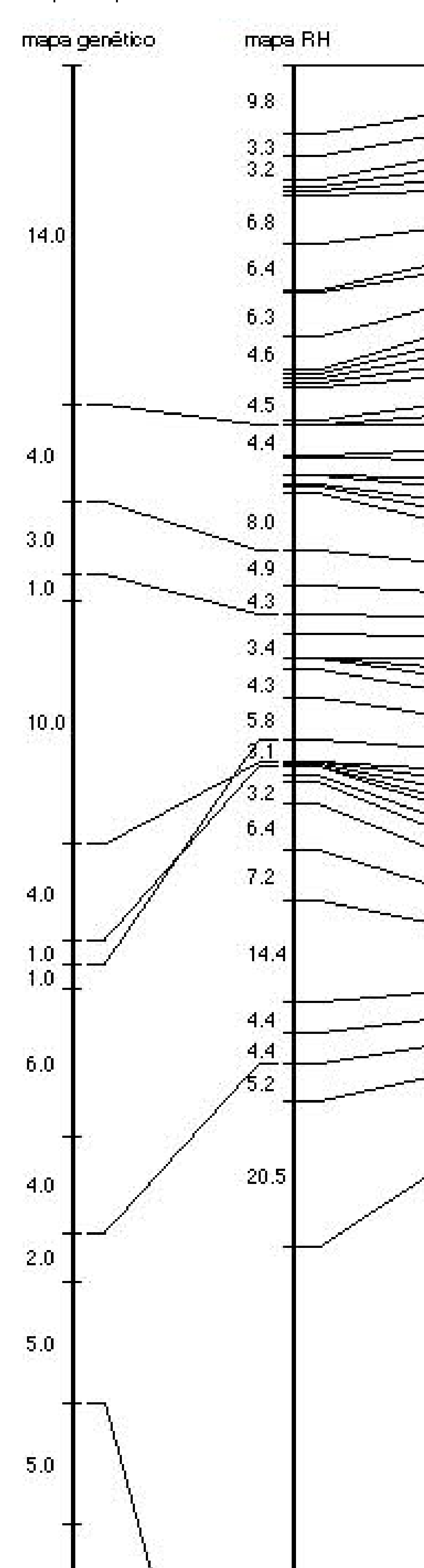
La avalancha de datos genéticos que se avecina aún no ha afectado a mucha gente. Pero es cuestión de tiempo. En los laboratorios se aíslan ya rutinariamente mutaciones genéticas asociadas con el cáncer, la enfermedad de Alzheimer y algunos tipos de enfermedades cardiovasculares. Desarrollar pruebas para detectar mutaciones en un gen conocido se ha convertido en un asunto bastante sencillo. Genzyme, empresa afincada en Cambridge, Massachusetts, anunció el pasado otoño una técnica de diagnóstico capaz de analizar simultáneamente ADN de 500 pacientes para 106 mutaciones diferentes en siete genes.

Cuando se tenga suficiente información sobre los efectos de las mutaciones, los resultados de las pruebas serán de gran utilidad para el médico, ya que se podrá determinar la probabilidad de que una persona desarrolle una enfermedad y quizá sugerir algún tipo de tratamiento para aumentar la esperanza de vida. Pero los estudios necesarios para conocer los efectos de las mutaciones requieren mucho tiempo. Y los datos genéticos pueden acarrear perjuicios inmediatos y graves. En particular, pueden precipitar cambios psicológicos gravosos y abrir la puerta a la discriminación.

En el pasado, la discriminación genética quedó relegada principalmente a los miembros de familias afectadas con enfermedades raras y que mostraban un patrón claro de herencia. Por ejemplo, los miembros de familias con Huntington, una enfermedad neurodegenerativa muy grave que se manifiesta en la edad adulta, tienen grandes dificultades a la hora de contratar seguros sanitarios, y a veces les resulta imposible. Según Collins, hasta el momento se conocen "unos pocos centenares" de personas que han perdido sus trabajos o sus seguros por el mero hecho de que con su patrimonio genético corrían el riesgo de contraer en el futuro una enfermedad; en la mayoría de los casos, porque un miembro de su familia había sido diagnosticado con una enfermedad de base genética

Cromosoma 17

Este mapa genómico parcial, que se muestra aquí y en las páginas siguientes, se publicó el pasado mes de diciembre. Ha sido realizado por expertos del Instituto de Inves-



tigaciones Biomédicas Whithead y Généthon, de Francia. Puede ser consultado en la página http://www-genome.wi.mit.edu/cgi-bin/contig/phys_map.

conocida. Pero, según las predicciones de Collins, a medida que aumente el número de pruebas de detección "veremos que eso sucederá a mayor escala, ya que todos corremos algún tipo de riesgo".

En la actualidad, las pruebas para detectar mutaciones asociadas con algún cáncer, por ejemplo, sólo se realizan en el marco de investigaciones que se llevan a cabo en grandes hospitales, ya que la interpretación de los resultados es todavía harto imprecisa. Pero hay fenómenos incontrovertibles. En familias con casos de cáncer de mama hereditario, que constituyen menos del 10 por ciento de todos los episodios, presentar una mutación en el gen *BRCA1* acarrea un riesgo del 85 por ciento de padecer la enfermedad, y un riesgo también del 45 por ciento de contraer cáncer de ovario. Algunas mujeres de esas familias, que saben que son portadoras de un gen *BRCA1* mutado, han decidido someterse a una mastectomía profiláctica y a una ooforectomía (extirpación de los ovarios). Ello puede reducir el peligro de contraer el cáncer, pero no lo elimina.

La incertidumbre es mayor, sin embargo, en el caso de una mujer que porte un gen *BRCA1* mutado pero no tenga una historia familiar de cáncer de mama. En esas situaciones, se desconoce el peligro, pero puede ser menor. Tampoco se sabe si el pertenecer a un grupo étnico determinado afecta a la probabilidad de contraer la enfermedad (en los judíos ashkenazi, por ejemplo, se da con mayor frecuencia un tipo determinado de mutación en el gen *BRCA1*, y un gen que causa neurofibromatosis tiene efectos más severos en blancos que en negros). Estas y otras fuentes de incertidumbre plantean graves dilemas a la hora del tratamiento. La elección entre cirugía radical y vigilancia intensiva, en forma de frecuentes mamografías, puede ser crucial. La reciente identificación de un segundo gen de cáncer de mama, el *BRCA2*, complica el asunto aún más.

Aunque los avances en el conocimiento del genoma llegarán algún día a eliminar esos dilemas, la mayoría de los científicos no esperan que ello ocurra en un futuro previsible. Para las mujeres a las que ya se les ha diagnosticado un cáncer de mama, no se sabe muy bien qué significado pueda tener, a la hora del tratamiento, que la prueba del *BRCA1* haya dado positiva. Incluso con un resultado negativo en la prueba, una mujer sigue teniendo el mismo riesgo, un octavo, que cualquier mujer de EE.UU. Estos factores han llevado a la Sociedad Norteamericana de Genética Humana y a la Asociación Nacional de Afectadas de Cáncer de Mama, un grupo de apoyo, a exigir que, por ahora, las pruebas del *BRCA1* se realicen sólo en el marco de la investigación. "Lucharemos contra la venta de esas pruebas antes de que exista un acuerdo sobre cómo utilizarlas", dice Mary Jo Ellis Kahn, miembro de la asociación que ha sobrevivido a un cáncer de mama y en cuya familia se han dado varios casos de la enfermedad.

Este tipo de prevención choca con las previsiones comerciales. Myriad Genetics, con sede en Salt Lake City, contempla ofrecer las pruebas para detectar el gen *BRCA1* a todas las mujeres diagnosticadas con cáncer de mama o de ovario, y a sus familiares cercanas, a finales de 1996. Si aceptaran sólo las personas diagnosticadas, serían más de 200.000 pruebas al año. Peter D. Meldrum, presidente de Myriad, afirma que su compañía está estudiando los riesgos para poblaciones diferentes. Collins, sin embargo, opina que los planes de Myriad son "potencialmente prematuros", ya que, según él, no



WILLIAM A. HASELTINE, presidente de Human Genome Sciences.

es seguro que se sepa lo suficiente sobre las mutaciones y las opciones de tratamiento como para justificar las pruebas a gran escala a finales de año.

OncorMed, establecida en Gaithersburg, vende ya pruebas de *BRCA1* para su uso en protocolos de investigación con mujeres de alto riesgo. La Asociación Nacional de Afectadas ha reclamado, con carácter de urgencia, el estudio del tipo de restricciones que deberían incluirse en esos protocolos. La misma compañía tiene entre manos la investigación de las mutaciones asociadas con una forma de cáncer de colon.

El organismo norteamericano competente, la Oficina de Alimentación y Fármacos (FDA), no ha regulado los servicios de pruebas genéticas. En enero, sin embargo, una comisión sobre pruebas genéticas creada por el programa genoma abordaba la posibilidad de solicitar a la FDA que limitase las pruebas de mutaciones asociadas a algún tipo de cáncer, hasta que no hubiese una información sólida sobre las posibilidades de tratamiento.

Algunas mujeres que saben que son portadoras de un gen *BRCA1* mutado (sólo unas docenas, por ahora) han decidido ocultar esa información a sus agentes de seguros, según Barbara B. Biesecker, del NGHGR. Temen que las aseguradoras consideren las mutaciones como un estado preexistente y, por tanto, se nieguen a cubrir los tratamientos relacionados con tal "circunstancia".

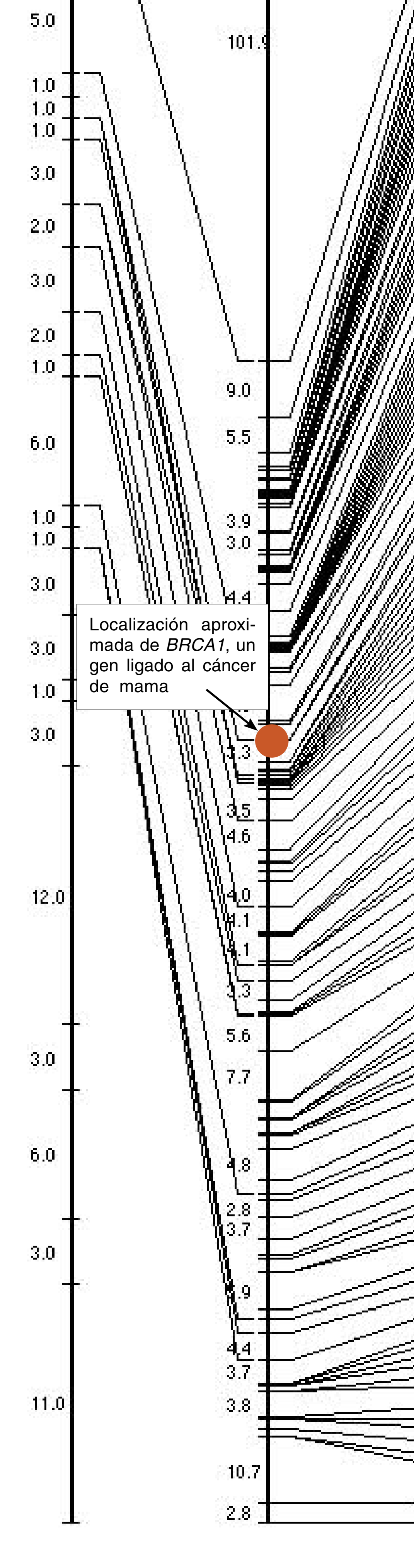
El asunto es espinoso. Las compañías de seguros médicos suelen negarse a ofrecer pólizas, o exigen primas desproporcionadas, a los individuos con una clara historia familiar de cáncer. El pasado año, la Asociación Nacional de Afectadas de Cáncer de Mama vio rechazada en repetidas ocasiones la petición de un seguro de enfermedad colectivo para los miembros de la directiva en Washington, porque eran sólo ocho, y algunos de ellos habían sobrevivido a un cáncer de mama. Para tener cobertura debían conseguir un número mayor de asociados.

La tendencia al secretismo en las pruebas genéticas parece haber calado. En cierta reunión de la Sociedad de Genética Humana, celebrada el pasado otoño, Thomas H. Murray, de la Universidad Case Western Reserve, preguntó a su auditorio si conocían pacientes que hubiesen solicitado someterse a pruebas genéticas de este tipo de forma anónima, o bajo un nombre falso. Se levantaron manos por toda la sala. En muchos estudios clínicos, a los pacientes se les advierte formalmente que los resultados de las pruebas pueden acarrear complicaciones con las aseguradoras, si éstas acceden a los historiales médicos de los pacientes. Para evitarlos, los investigadores obtienen a veces unos documentos legales, o "certificados de confidencialidad", que impiden a los tribunales acceder a los datos obtenidos en una investigación.

Otros pacientes evitan simplemente hacerse las pruebas, renunciando así a cualquier beneficio médico que ello pudiera reportarles. Las personas con von Hippel-Lindau (VHL), rara enfermedad hereditaria que produce tumores en el cerebro y en los riñones, suelen encontrar muchos problemas a la hora de contratar un seguro de enfermedad, debido a que las atenciones quirúrgicas que pueden necesitar son muy caras. Aunque no hay una terapia profiláctica para prevenir ese tipo de tumores, las personas con enfermedad de VHL pueden alargar su esperanza media de vida sometiéndose a tratamientos regulares de resonancia magnética y a la posterior extirpación quirúrgica de los tumores. Según William C. Dicson, de la Asociación de Familiares de VHL, muchos padres con este síndrome no quieren que sus hijos pasen por las pruebas para detectar mutaciones en el recientemente descubierto gen de la VHL, ya que temen que el diagnóstico genético impida que se les extienda un seguro médico.

Los padres que padecen policistitis renal, quizá la enfermedad hereditaria grave más común, también suelen decidir no someter a sus hijos a las pruebas genéticas, por las misma razones relacionadas con los seguros, según indica Gregory G. Germino, un investigador de la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins. Aproximadamente 600.000 norteamericanos padecen esa enfermedad, aunque en su mayoría lo ignoran. En 1994, y con técnicas desarrolladas en el marco del proyecto genoma, se descubrió el gen PKD1, responsable último de muchos de esos casos. Según Germino, las pruebas para detectar dicho gen pueden a veces mejorar la terapia médica en los niños.

Este tipo de informes ha disparado las alarmas de los responsables sanitarios. Un grupo de trabajo encargado de las implicaciones sociales, éticas y legales del programa genoma humano, junto con el Plan Nacional sobre



el Cáncer de Mama, una iniciativa presidencial, acaba de recomendar la prohibición del uso de información genética, o el requisito de una prueba genética, como base para limitar o denegar un seguro médico por parte de las aseguradoras.

Los agentes de seguros no suelen preguntar directamente por los resultados de las pruebas genéticas. Las indagaciones sobre la salud o causa de la muerte de los padres de la persona en cuestión suelen ser suficientes para clasificar a muchas de esas personas entre las de alto riesgo. Pero las aseguradoras pueden considerar el requisito de las pruebas genéticas para determinadas pólizas. "Ahora no hacen preguntas sobre pruebas genéticas, pero seguro que esta actitud cambiará", comenta Nancy S. Wexler, presidenta de la Fundación de Enfermedades Hereditarias. Wexler tiene un 50 % de probabilidad de padecer la enfermedad de Huntington.

Como los pacientes con enfermedades genéticas se muestran reacios a identificarse, es difícil evaluar el impacto de la discriminación. Pero hay nuevos datos que refuerzan los primeros datos anecdóticos y que sugieren que el fenómeno está muy extendido. En una de las primeras encuestas amplias, programada para su publicación, en *Engineering and Scientific Ethics*, el equipo de Lisa N. Geller, de la Facultad de Medicina de Harvard, describen cómo enviaron cuestionarios a personas que, aunque libres de síntomas, tenían algún riesgo de contraer una enfermedad genética. De los 917 que respondieron, 455 aseguraban que habían sufrido algún tipo de discriminación al revelar el diagnóstico genético.

Entrevistas complementarias realizadas por los investigadores suministraron detalles de aseguradoras (médicas y de vida) que rehusaron o cancelaron las coberturas, agencias de adopción que solicitaban a los posibles padres "pasar" una prueba genética (y que en una ocasión malinterpretaron los resultados) y empresarios que despidieron o no contrataron porque el implicado padecía alguna enfermedad genética, tratable médicamente, o porque tenía alguna posibilidad de padecerla. Paul R. Billings, del Hospital de Veteranos en Palo Alto, uno de los autores del estudio, ha declarado que "la gente rechazará las pruebas genéticas por miedo a la discriminación". En otro estudio, realizado por E. Virginia Lapham, de la Universidad de Georgetown, el 22 % de un grupo de 332 personas que tenían alguna enfermedad genética en su familia, declaró que esa circunstancia le había impedido la contratación de un seguro médico.

Varios países europeos han tomado medidas para evitar los abusos asociados con los datos genéticos. El seguro médico básico no constituye ningún problema especial en Europa, donde está regulado como derecho fundamental de los ciudadanos que los gobiernos deben proteger. Con todo, en Francia, Bélgica y Noruega existen leyes que impiden el uso de información genética por parte de las compañías aseguradoras y la mayoría de los empresarios. En los Países Bajos se garantiza un seguro de vida básico, y en Alemania hay ciertas medidas protectoras.

En EE.UU. varios estados han promulgado leyes que limitan la discriminación fundada en los datos genéticos. Las leyes federales prohíben la discriminación en el empleo, y varios proyectos presentados ahora ante el Congreso tratarán de impedir la discriminación en los seguros por motivos genéticos. Pero las perspectivas son inciertas.

Los posibles perjuicios psicológicos derivados de las pruebas genéticas están también recibiendo una atención cada vez mayor. Como los resultados de las pruebas pueden afectar a todos los miembros de una familia, en su sentido más amplio, las relaciones entre aquéllos pueden verse seriamente alteradas debido a los sentimientos de culpabilidad. El miedo a esas consecuencias puede explicar la práctica escasa de una prueba que está disponible desde hace varios años, y que permite identificar a los portadores del gen de la fibrosis quística, a pesar de que tales individuos carecen de riesgo.

Los expertos en consejo genético coinciden en que, debido a los posibles perjuicios, los niños no deben ser sometidos a pruebas de detección de mutaciones que pronostiquen enfermedades que no se desarrollarán hasta la edad adulta, a menos que exista la posibilidad de una intervención médica. Según esto, los niños deben quedar exentos de pruebas detectoras de la enfermedad de Huntington, ya que no existe una terapia preventiva contra el desarrollo de los desarreglos motores y mentales que la caracterizan. Sin embargo, hay padres que sí solicitan esas pruebas para sus hijos: en algún caso para no pagar la educación superior si al final el muchacho va a sucumbir a la enfermedad.



MARY JO ELLIS KAHN, de la Asociación Nacional de Afectadas de Cáncer de Mama.

La principal red norteamericana de laboratorios dotados de capacidad técnica para realizar este tipo de pruebas se denomina Helix. Según un estudio acometido por Dorothy C. Wertz y Philip R. Reilly, del Centro Shriver de Retraso Mental, en Waltham, el 23 por ciento de los laboratorios de la red habilitados para detectar la mutación responsable de la enfermedad de Huntington han realizado las pruebas a menores de 12 años. Más del 40 por ciento de los laboratorios Helix han aplicado las pruebas directamente a los pacientes, sin asistencia médica. No siempre el público comprende el significado del diagnóstico genético, comenta Wertz. Y no sólo eso, agrega: muchos médicos no están capacitados para emitir un consejo genético.

En el haber de las pruebas debemos hacer constar, no obstante, que ciertos pacientes con familias afectadas con cáncer de colon hereditario y posiblemente también cáncer de mama, han adoptado decisiones médicas sensatas como resultado de descubrimientos facilitados por el programa genoma. Algunos portadores de una mutación que predispone al cáncer de colon, por ejemplo, han aceptado la cirugía del colon en cuanto han empezado a producirse los cambios amenazadores. Es ése un procedimiento que probablemente ha salvado sus vidas. Nuevas terapias ansiosamente esperadas, sin embargo, parecen más lejanas.

Collins recuerda que sólo seis años después de que un equipo que él codirigía encontrara el gen asociado con la fibrosis quística, en 1989, ya se estaban ensayando con pacientes medicamentos diseñados para contrarrestar los efectos producidos por el gen mutado. Sin embargo, se ignora cuánto tardará en llegar un tratamiento definitivo.

La perspectiva de tratamiento que más ha atraído la atención de la gente es la terapia génica, si bien resulta más descriptivo hablar de transplante de genes. No obstante, los intentos para tratar la hipercolesterolemia familiar, la fibrosis quística y la distrofia muscular de Duchenne han resultado fallidos hasta el pasado año, aparentemente porque las células de los pacientes no incorporaban suficiente cantidad de genes transplantados. Los primeros tratamientos para corregir la deficiencia en desaminasa de adenosina, descritos en esta revista por W. French Anderson (*véase* "Terapia génica" INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1995), muestran un efecto bastante discreto en el mejor de los casos. El pasado diciembre, una revisión del NIH concluía que "hasta el momento, no ha quedado definitivamente demostrada la eficacia clínica de ningún protocolo de terapia génica".

A pesar de todos los problemas, la emergente revolución genética está ya causando movimientos sísmicos en el mundo de los negocios. Las compañías farmacéuticas han dedicado miles de millones de pesetas a la búsqueda de genes responsables de enfermedades, ya que ellos nos ilustran sobre el tipo de moléculas candidatas a convertirse en el punto de mira de medicamentos o reactivos para la diagnosis.

J. Craig Venter, del Instituto de Investigaciones Genómicas, de Gaithersburg, ha ideado una estrategia más directa, que analiza ARN mensajeros, los productos que se crean cuando se activan los genes. La técnica produce unas marcas químicas que revelan cierta información básica relativa a los genes asociados, sin gran dispendio de trabajo.

Algunos expertos no quedaron muy impresionados por la propuesta de Venter, ya que no proporcionaba una información tan global como la que ofrece la secuenciación a gran escala. Pero funciona. Dos compañías se han embarcado en una suerte de microscópica fiebre del oro en busca de genes lucrativos utilizando la estrategia de Venter. Human Genome Sciences (casa matriz de la organización de Venter) e Incyte Pharmaceuticals, de Palo Alto, andan ahora patentado secuencias afanosamente.

Williams A. Haseltine, presidente de Human Genome Sciences, asegura que su compañía ha identificado el 90 por ciento de los genes humanos y ha utilizado docenas de ellos para fabricar proteínas con propiedades de interés terapéutico. Los hallazgos de Human Genome Sciences, según Haseltine, han provocado también un "notable impacto" en el programa de desarrollo de nuevos fármacos de su principal socio, SmithKline Beecham. Por su parte, Incyte asegura haber identificado "muchísimos" genes humanos y ha encontrado clientes para sus bases de datos.

Las perspectivas de explotación comercial del genoma despiertan inquietud en ciertos medios. Se recela, sobre todo, del Proyecto Diversidad del Genoma Humano. Este plan, sin vinculación formal con el proyecto genoma, tiene como objetivo el estudio de las variaciones de secuencias genéticas entre diferentes grupos en todo el mundo.

Los patrocinadores del proyecto diversidad, concebido inicialmente por Luigi Luca Cavalli-Sforza, de la Universidad de Stanford, señalan que las secuencias generadas por el propio proyecto genoma derivarán principalmente de ADN de donantes europeos y norteamericanos. Según Cavalli-Sforza, si se estudiase la existencia de variación, del 0,1 por ciento, entre el ADN de gente de todo el mundo, se cosecharía una información muy valiosa sobre la adaptación.

Henry T. Greely, profesor de derecho de Stanford y coorganizador del proyecto diversidad, reconoce que los datos sobre variación genética podrían invitar a los racistas a realizar análisis arbitrarios para justificar la discriminación. Pero se defiende alegando que el proyecto asumirá su responsabilidad en la lucha contra tales abusos, y apunta que los datos ya disponibles ilustran sobre la superficialidad de las diferencias raciales: la mayor parte de esa variación del 0,1 por ciento entre seres humanos se da entre miembros de la misma raza, y no entre razas distintas.

El proyecto ha recibido duras críticas. La Fundación Internacional para el Avance Rural (RAFI), una modesta organización con sede en Ottawa que se opone a las patentes de seres vivos, dice, por boca de Jean Christie, que se opone al proyecto diversidad porque éste producirá líneas celulares que pueden ser patentadas por las compañías cazagenes de los países ricos.

Greely insiste en que las normas del proyecto eliminan la posibilidad de que las muestras puedan utilizarse con fines lucrativos sin el consentimiento de los donantes. A pesar de esa seguridad, un comité de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Cultura y la Ciencia (UNESCO) ha criticado al proyecto la falta de contactos con grupos indígenas durante su fase de planificación. La controversia levantada por la concesión de una patente al NIH sobre una línea celular derivada de un oriundo de Papúa Nueva Guinea ha avivado el debate sobre la explotación. Se entiende, pues, que el proyecto diversidad del genoma encuentre dificultades a la hora de recabar subvenciones de fondos públicos.

No sabemos cómo acabará el tema de las patentes. Collins afirma que pretender patentar todos los genes secuenciados resultaría "desestabilizador", ya que pondría en peligro la cooperación entre investigadores. Tradicionalmente, los especialistas han gozado de libertad a la hora de llevar a cabo investigaciones no sometidas a patentes. Esta libertad puede verse amenazada, comenta Rebecca Eisenberg, experta en patentes de la Universidad de Michigan. Cuantos más especialistas se plieguen a la voluntad de las empresas, por vínculos laborales, con mayor facilidad podrá patentarse el genoma.

Antes de que un gen pueda patentarse, el "inventor" debe conocer a grandes rasgos por lo menos la función que desempeña, para cumplir así el requerimiento legal de utilidad. Ahora bien, la industria controla la mayoría de los recursos investigadores con capacidad para descubrir eficazmente las propiedades útiles de tales genes. Por tanto, la comercialización parece una consecuencia inevitable de la exploración científica del genoma, como lo ha sido para otro tipo de exploraciones. Aunque la Oficina de Patentes de EE.UU. ha accedido recientemente a examinar algunas cuestiones planteadas por las patentes de genes, una vuelta atrás en este tema, con la consiguiente anulación de las patentes, como solicitan algunos críticos, parece improbable. Y mientras siga habiendo dinero para invertir en estos temas, los países ricos continuarán probablemente beneficiándose de ello.

Resulta, no obstante, obligado preguntarse qué beneficio sacará de todo esto el resto del mundo. Algunas de las terapias génicas sometidas a ensayo se adaptarán a determinados pacientes. Pero James V. Neel, de la Universidad de Michigan, uno de los pioneros en genética humana, ha advertido ya que "las terapias individuales serán demasiado caras" para su uso generalizado. Actuaciones "humildes", como un mejor control de la dieta y el ejercicio pueden aliviar el impacto de la diabetes adulta, con una mejor relación costo-eficacia que la medicina genética, señala Neel. Al tiempo que apremia a los genéticos a prestar al medio ambiente, cada vez más degradado, que muchos seres humanos soportan, la misma atención que al ADN.

Con todo, la carrera del gen sigue su curso. Se encontrarán mejores medicinas, algunos harán fortuna y otros resultarán perjudicados. Porque de lo que no cabe duda es de que, si bien todos los seres humanos comparten ADN, no todos compartirán sus beneficios. Según un informe de la Organización Mundial de la Salud, en 1993 murieron 12,2 millones de niños menores de 5 años en los países en vías de desarrollo. Más del 95 por ciento de esas muertes pudieron haberse evitado, según la OMS, si esos niños hubiesen estado bien nutridos y hubiesen tenido acceso a los cuidados médicos que ya son una práctica normal en los países que pueden costeárselos. Para los desheredados de la Tierra, la medicina genética es todavía un sueño muy lejano.

Ciencia y empresa

Vinos finos

Crianza

En algunas zonas vinícolas españolas, como Montilla-Moriles y Jerez, se produce un tipo de vino especial llamado vino fino. Pertenece a la categoría de los vinos generosos, englobados en los "vinos de calidad producidos en regiones determinadas", o VCPRD. Su práctica de elaboración específica consiste en un proceso de envejecimiento o crianza biológica efectuado por unas levaduras de "flor" o de "velo". Estos microorganismos, que se desarrollan de manera espontánea sobre la superficie del vino tras la fermentación alcohólica total del mosto, confieren al producto unas características analíticas y organolépticas distintivas, entre las que destacan su color pálido amarillento, su transparencia, la sutileza de sus infinitos aromas y su paladar seco, fragante y ligeramente amargo.

La producción de finos se sustenta principalmente en dos variedades de uva: la variedad "Palomino fino" y la variedad "Pedro Ximénez". Ambas se cultivan en el marco de Jerez. Predomina la primera en esta región vitivinícola, mientras que la segunda es la variedad cultivada de forma casi exclusiva en el marco de Montilla-Moriles. Diferencias en clima y prácticas culturales y enotécnicas originan productos muy similares, aunque con matices distintivos.

Mientras que en Jerez la uva se recolecta con un contenido potencial en alcohol alrededor del 12-13 % en volumen, en Montilla-Moriles la uva suele alcanzar el 15-16 % en las fechas de vendimia. Esta diferente graduación alcohólica, obtenida en los vinos recién fermentados, hace innecesaria la práctica del encabezado, o adición de alcohol vínico, en una zona mientras que es rutina obligada en la otra.

Ningún término más apropiado que el de "crianza" para definir el conjunto de procesos naturales, biológicos y químicos, que se producen en el vino. Debidamente controlados, conducen a la obtención de un producto final de una elevada calidad y con unas características muy peculiares de este tipo de elaboración.

Suelen emplearse barriles de madera de roble americano como recipientes en los que se lleva a cabo la crianza. Este material resulta idóneo principalmente por su porosidad, que permite un adecuado intercambio de gases, al mismo tiempo que enriquece el vino en determinados componentes de la madera, extraídos por la acción del alcohol y que aportan interesantes notas olfativas y de sabor.

El vino base destinado a crianza biológica ha de cumplir unos requisitos mínimos que permitan el desarrollo de las transformaciones que se producen en el vino durante la etapa de crianza. Un buen vino base debe tener un contenido en etanol en torno al 15,5 % en volumen, imprescindible para una buena formación del velo y una acidez que no exceda de 4-5 gramos por litro (expresada en ácido tartárico); asimismo, ha de ser un vino seco, con unos contenidos en azúcares reductores entre 1-2 gramos por litro y poseer ciertas cualidades organolépticas.

La técnica seguida en la crianza consiste esencialmente en almacenar el vino en botas de roble americano de 500 litros de capacidad, dejando vacía su sexta parte para que pueda desarrollarse la levadura de flor. Las botas se disponen en filas superpuestas, unas sobre otras, donde cada fila horizontal recibe el nombre de escala, constituyéndose así el sistema de soleras y criaderas. Las botas de una misma escala contienen el mismo vino y con el mismo grado de crianza. La primera escala o solera es la que está situada más próxima al suelo y contiene el vino más viejo. De la solera se extrae el vino para su embotellamiento, dejándose en ella de 2/3 a 3/4 de su contenido, operación que se repite de tres a cuatro veces al año. La solera se rellena con vino procedente de la segunda escala o primera criadera, ésta a su vez se rellena con vino de la tercera escala o segunda criadera, y así sucesivamente hasta la última escala, también llamada añada, que contiene el vino fresco de la vendimia del año.

Para favorecer la crianza del fino, las bodegas deben acondicionarse de suerte que mantengan una temperatura constante entre 15 y 18 grados C durante todo el año, una humedad relativa lo más alta posible y

1. Esquema del proceso industrial de crianza mediante el sistema de soleras y criaderas

una buena ventilación. Mediante este procedimiento se consigue un vino de características organolépticas similares de un año a otro, al mismo tiempo que se pone en contacto a las levaduras con vinos más jóvenes, que aportan los nutrientes necesarios para el desarrollo y mantenimiento del velo lográndose, consecuentemente, la homogeneidad y la inalterabilidad deseadas en la crianza del fino.

Después de la fermentación alcohólica y tras los fríos del invierno, los vinos destinados a crianza florecen espontáneamente con la subida de las temperaturas a la llegada de la primavera. Esta flor, también llamada velo pues llega a cubrir toda la superficie del vino formando una tupida capa, se revela examinada al microscopio como un complejo mosaico de pequeñas e innumerables levaduras.

La caracterización de las levaduras que forman velo sobre los vinos de Montilla-Moriles y de Jerez ha permitido identificar varias razas fisiológicas (*montuliensis, cheresiensis, capensis, chevalieri, bayanus,* etcétera) de la especie *Saccharomyces cerevisiae* que presentan esta peculiaridad. El aspecto visual del velo formado y su velocidad de desarrollo dependen de la raza de levadura y de las condiciones medioambientales que soportan (composición química, temperatura, humedad, etcétera). Un buen velo es untuoso al tacto, presenta un aspecto rugoso en la superficie, un color blanco-marfil y varios milímetros de espesor.

La levadura de flor crece en un medio adverso, ya que las principales fuentes de carbono necesarias para el desarrollo de estos microorganismos, pensemos en los hidratos de carbono, los han consumido, ellas mismas u otras levaduras, durante la fermentación alcohólica. Pero pueden utilizar en un modo de vida aerobio otras fuentes de energía, fundamentalmente etanol y glicerina. A partir de estos compuestos mayoritarios en los vinos y con la participación del oxígeno, construyen su estructura celular, y así proliferan en unas condiciones en que otras levaduras no sobreviven.



2. Aspecto del velo formado por Saccharomyces cerevisiae *raza* capensis *en experiencias de laboratorio*

Entre las diversas transformaciones de interés enológico que la levadura de flor produce sobre la composición del vino, destaca la oxidación del etanol a acetaldehído (*véase recuadro*). Además de la producción de acetaldehído, durante la crianza biológica se producen cambios en los contenidos de la mayoría de los componentes volátiles (responsables del aroma) y no volátiles del vino. Destacan los descensos en etanol, glicerina, acetato de etilo y de los valores de la acidez volátil (ácido acético principalmente), aprovechados por las levaduras en su metabolismo. Este consumo de nutrientes condiciona también la periodicidad del refresco o rocío de las botas con vinos más jóvenes procedentes de escalas superiores y pone de manifiesto la necesidad de reponer el etanol consumido.

La acidez del vino puede también disminuir por precipitaciones de bitartrato potásico durante el tiempo de envejecimiento, al igual que por reacciones de esterificación, por transformaciones de ácidos más fuertes en otros más débiles o por ambas. La pérdida de acidez y glicerina que se produce durante la crianza contribuye a que los finos adquieran la ligereza de paladar y el delicado amargor que los caracteriza. Por otra parte, los contenidos en glicerina constituyen un índice del grado de crianza, siendo menores los valores en los vinos que han permanecido más tiempo bajo velo.

La originalidad y atracción que este sistema de crianza ejerce sobre los profesionales del vino han merecido la atención de los químicos, si bien las publicaciones que permitan establecer claramente la evolución que los componentes del aroma del vino fino sufren durante su proceso de elaboración artesanal no son demasiado numerosas. Recientemente, E. Martínez de la Ossa y colaboradores estudiaron la evolución de determinados constituyentes del aroma en el sistema tradicional de "soleras" utilizado en Jerez de la Frontera. Nuestro grupo de la Universidad de Córdoba ha analizado la fracción del aroma para así caracterizar a los vinos Montilla-Moriles según sus contenidos en los componentes volátiles más significativos.

Contenidos en los principales componentes volátiles del vino y su evolución con el grado de crianza

AROMAS (MG/L.)	VINO BASE	VINO DE 2 AÑOS	VINO DE 5 AÑOS
ACETALDEHIDO	6,0	189	243
1,1-DIETOXIETANO	4,4	45,3	81,0
ACETATO DE ETILO	1,4	45,9	38,9
Σ ALCOHOLES SUPERIORES	89	386	419
Σ ACETATOS (*)	1,30	1,50	1,70
Σ ESTERES ETILICOS C_6, C_8 Y C_{10}	0,547	0,370	0,291
Σ ACIDOS GRASOS C_6, C_8 Y C_{10}	6,05	3,11	3,11
Σ LACTONAS	6,5	25,8	33,5
Σ TERPENOS LIBRES	0,523	2,42	4,72

(*) NO SE INCLUYE EL ACETATO DE ETILO

El cambio más destacable que experimentan los componentes volátiles del vino durante la crianza biológica estriba en el aumento de la concentración de acetaldehído. También incrementan notablemente sus contenidos los alcoholes superiores, que constituyen más del 90 por ciento de la fracción aromática de estos vinos, aunque contribuyen más a la intensidad del aroma que a su calidad. Se desconoce el origen exacto de estos incrementos. Aunque se han citado como posibles agentes el metabolismo celular, transformaciones químicas de otros componentes del vino, pérdidas de agua a través de la madera y otros, nosotros hemos comprobado la implicación, en ese fenómeno, de la síntesis de acetatos de alcoholes superiores, lactonas y terpenos por parte de las levaduras de velo. Los acetatos y terpenos libres, que presentan olores afrutados y florales, aportan cualidades positivas al aroma del vino.

Los ácidos grasos de cadena media de 6, 8 y 10 átomos de carbono y sus ésteres etílicos muestran contenidos inferiores en los vinos con mayor grado de crianza. Es un fenómeno conocido la retención de estos compuestos en las paredes celulares de las levaduras, lo que implicaría un descenso de sus contenidos en el vino. Además, la posible hidrólisis de los ésteres etílicos, junto con el consumo de estos ácidos grasos por las levaduras y su posible transformación química vienen a justificar tales descensos. Los términos aromáticos relacionados con los ácidos grasos volátiles no hacen referencia a vinos de buena calidad; por tanto, su pérdida podría considerarse positiva para el aroma de los finos. No puede decirse lo mismo, en principio, de sus ésteres etílicos, que presentan olores individuales agradables.

En conjunto, la somera descripción realizada quiere ser sólo un atisbo de la complejidad del proceso de envejecimiento biológico del vino fino. Pero es esa complejidad la que hace transcender al vino por encima de la técnica, la química o la agronomía hacia un mundo de sensaciones que

Papel de la levadura de la flor en la crianza del vino

Entre las diversas transformaciones de interés enológico que la levadura de la flor produce sobre la composición del vino, destaca la oxidación del etanol a acetaldehído por acción del nicotinadenindinucleótido (NAD) en presencia de la enzima alcoholdeshidrogenasa (ADH). El acetaldehído aporta al vino el olor punzante y característico de fino, por lo que algunos autores consideran su contenido como un índice del grado de crianza. Además, el acetaldehído es punto de partida de numerosas reacciones que se producen durante la crianza y que contribuirán decisivamente al *bouquet* y color que definen a los finos.

El acetaldehído (*reacción 1 en el esquema de la derecha*) se combina con el anhídrido sulfuroso libre presente en el vino para dar lugar al ácido etanol-sulfónico, con lo que aumenta la proporción de anhídrido sulfuroso combinado. Los experimentos realizados por E. Haslam y T. H. Lilley en 1988 (*C.R.C. Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 27:1) demuestran que la presencia de acetaldehído en el medio favorece la formación de compuestos de condensación entre moléculas de taninos y entre otros compuestos fenólicos, como las procianidinas (*reacción 2*). Los productos de adición formados son compuestos de elevado peso molecular, por lo que precipitan fácilmente y provocan una disminución del color y de la astringencia del vino; en buena medida, esta reacción es responsable de la palidez de color y de la suavidad al paladar de los vinos finos.

La reacción 3, ocurrida entre acetaldehído y etanol conduce a la formación de 1,1-dietoxietano o dietilacetal. Aunque este compuesto puede sintetizarse por vía química, las levaduras de velo incrementan sus contenidos en el vino, por lo que contribuye significativamente al aroma de estos vinos con un olor fuerte, dulce y afrutado.

Dos moléculas de acetaldehído (*reacción 4*) se condensan para formar una molécula de acetoína, cuya reducción posterior lleva a la formación de 2,3-butanodiol o butilenglicol. Aunque la evolución de este compuesto durante el envejecimiento es compleja, se observa una tendencia al aumento durante la crianza biológica. Acetoína y 2,3-butanodiol son componentes básicos del *bouquet* de los vinos, si bien éste se halla en proporciones mayores que aquélla.

El acetaldehído interviene en otras reacciones de menor importancia cuantitativa, cuya consecuencia final es la disminución de sus contenidos en el vino. Por ejemplo, la dismutación para formar etanol y ácido acético (*reacción 5*), o la oxidación química a ácido acético (*reacción 6*), metabolizado luego por las levaduras, no modifican apenas los contenidos de estos tres compuestos y, por tanto, no influyen mucho sobre el *bouquet* del vino.

$CH_3\,CH\,SO_3H$ / OH
ACIDO ETANOL-SULFONICO
1 SO_2 H_2O
2 COMPUESTOS DE ADICION — Taninos Polifenoles
3 $CH_3\,CH_2\,OH$ → $CH_3\,CH(OC_2H_5)_2$ 1,1-DIETOXIETANO
4 $CH_3\,C{=}O$ H → $CH_3\,C(=O)\,CH(OH)\,CH_3$ ACETOINA → H_2 → $CH_3\,CH(OH)\,CH(OH)\,CH_3$ 2,3-BUTANODIOL
5 $CH_3\,C{=}O$ H → $CH_3\,CH_2\,OH$ ETANOL + $CH_3\,C{=}O$ OH ACIDO ACETICO
6 O_2 → $CH_3\text{-}C{=}O$ OH ACIDO ACETICO
$CH_3\,C{=}O$ H ACETALDEHIDO

Tomado de J. Casas: **Descripción resumida de la técnica enológica de los vinos de Jerez.** ***III Jornadas Universitarias sobre el jerez. Servicio Publ. Univ. Cádiz, págs. 243-252***

entronca directamente con la sociología. No en vano, Teócrito de Siracusa, poeta experto en vinos antiguos, decía que "el vino y la verdad son una misma cosa", aludiendo a esa virtud que tiene el vino de volver sincero al hombre para hermanar los espíritus y descubrirlos generosamente en espontáneas confidencias.

Luis Zea, Mª B. Cortés,
J. Moreno y M. Medina
Depto. Química Agrícola y Edafología. Facultad de Ciencias. Córdoba

Comunicaciones vía radio

El sistema DECT

Forma ya parte del decorado diario la imagen del individuo aplicado a una radioterminal telefónica en la calle, el coche, el despacho o el hogar para llamar o recibir llamadas. Buena parte de la aceptación que han tenido las comunicaciones personales vía radio se debe a que permiten el acceso del usuario a los servicios disponibles en las redes fijas. El acceso vía radio, a diferencia del establecido en las redes fijas, se puede realizar en cualquier instante y lugar, siempre que los interlocutores se muevan dentro de una área determinada, o zona de cobertura.

Podemos clasificar en dos categorías las comunicaciones personales vía radio: celulares y sin hilos. Las primeras suelen limitarse a las comunicaciones telefónicas y de datos de baja velocidad, en áreas de cobertura denominadas células, servidas por una o más estaciones base. En las comunicaciones personales inalámbricas, la aplicación más extendida se presenta con los teléfonos sin hilos, de técnica analógica y radio de acción entre 50 y 100 metros.

Las comunicaciones celulares y las inalámbricas (supondremos siempre que son personales) presentan características comunes y también notables diferencias. Así, los sistemas sin hilos están asociados con equipos terminales de baja complejidad pero con una buena calidad en la voz transmitida, el entorno de movilidad es casi-estático y el tamaño de las células (área geográfica con una o varias estaciones base asociadas que ofrecen una cobertura de servicio) es del orden de varios cientos de metros.

En los sistemas celulares el tamaño de las células es muy superior (pocos kilómetros), con grandes variaciones en la señal debidas a los desvanecimientos producidos en el radioenlace entre el terminal de usuario y las estaciones base existentes en cada una de las células en que se divide el área de cobertura. La movilidad, muy elevada, admite velocidades de desplazamiento de los interlocutores del tipo de la celeridad de los coches, trenes, etc. Para hacer frente a este entorno, las terminales de usuario y las estaciones base presentan un diseño más complejo.

Con la utilización de la técnica digital en las comunicaciones sin hilos, aparecen nuevos sistemas que disponen de niveles de funcionalidad muy superiores a los de sus predecesores analógicos. Digitales son los sistemas inalámbricos CT2 ("Cordless Telephone-2), DECT ("Digital European Cordless Telephone") o PHS. En éstos, las velocidades de transmisión de datos son más altas y permiten aplicaciones más refinadas, como la del acceso a una centralita privada inalámbrica (PBX, de "Private Branch Exchanges"), muy apropiada para entornos de negocios y servicios.

Otro ejemplo de aplicación es el ofrecido por el acceso público al servicio Telepunto. Aquí, un usuario que disponga del terminal apropiado, se encuentre dentro de la zona de cobertura y esté abonado a ese servicio, puede efectuar y recibir llamadas en cualquier lugar, sin necesidad de recurrir a las cabinas telefónicas.

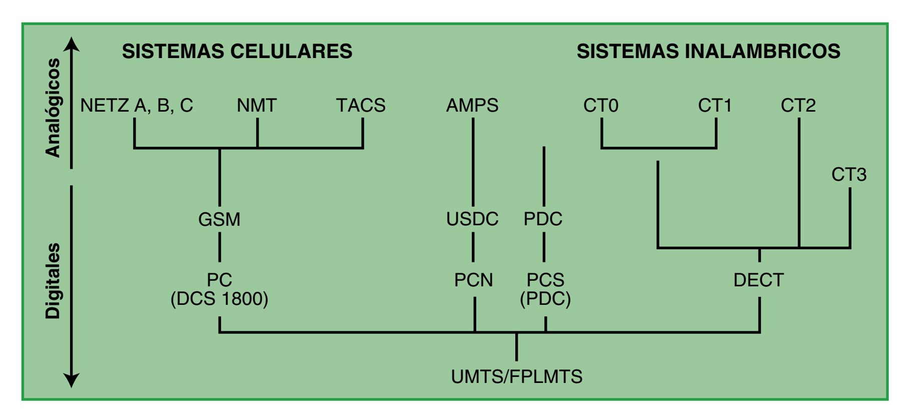
Se podría pensar en otras aplicaciones para las comunicaciones sin hilos; por ejemplo, como elemento sustitutivo del bucle de abonado (la distancia que separa el terminal de abonado de la central pública de la red telefónica básica), evitando onerosas inversiones y futuros costes de mantenimiento.

¿Qué papel desempeña en las comunicaciones vía radio el sistema estándar DECT? La primera generación de estos equipos, cuyo diseño originario apareció en Estados Unidos en 1984, fue analógica. Tenía su talón de Aquiles en la escasez de frecuencias disponible: 10 desde el terminal a la estación base y otras 10 en sentido inverso.

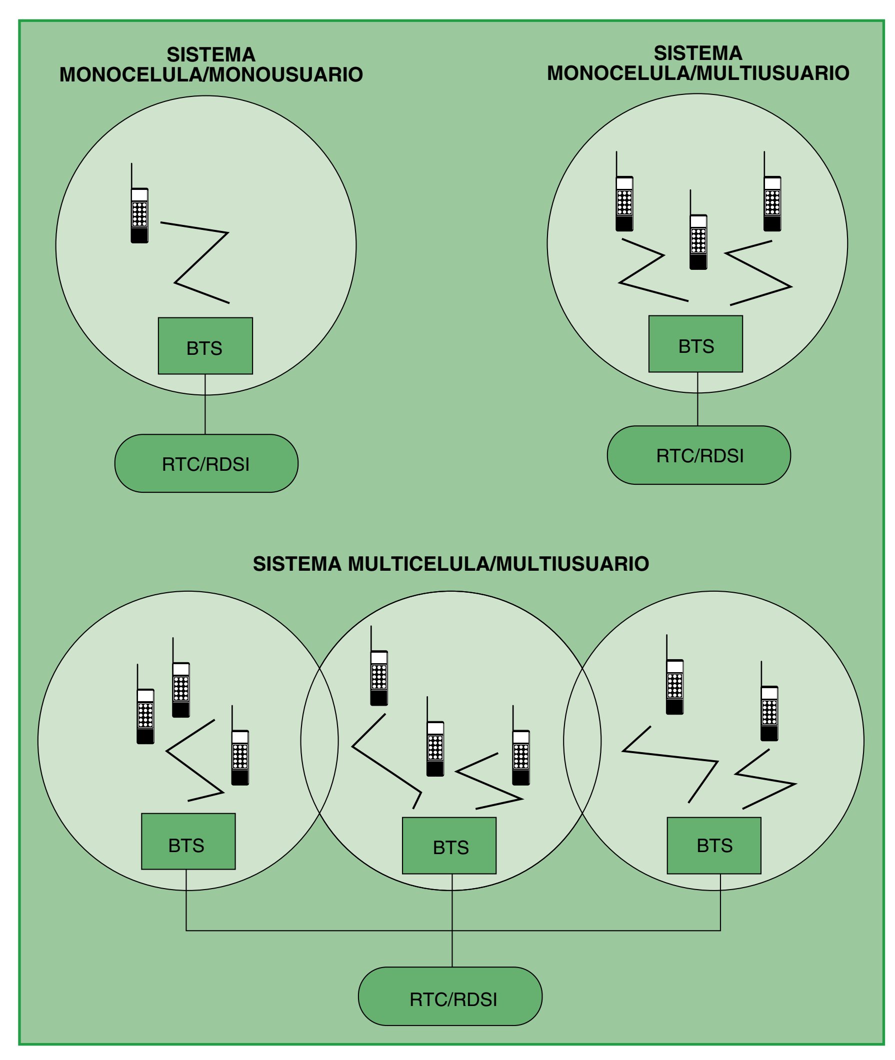
Para evitar la importación ilegal de estos dispositivos a Europa, Gran Bretaña produjo un estándar similar al americano; lo denominó MPT 1322, también conocido como CT0 ("Cordless Telephone-0"). Son sistemas primitivos del tipo monocélula/monousuario; es decir, hay sólo una estación base con uno o varios canales y un único teléfono portátil, la zona de cobertura no excede de 100 a 200 metros y el margen de frecuencias que utilizan está en la banda de 46-50 megahertz. Pero presentan inconvenientes: interferencias con otros usuarios, falta de seguridad y baja calidad de la comunicación.

La Conferencia Europea de Correos y Telecomunicaciones, o CEPT, especificó las características de los teléfonos sin hilos CT1. Siguen siendo analógicos, pero se dispone de un número mayor de canales (40 pares de frecuencias) y, antes de efectuar la llamada, se selecciona el canal con la mejor calidad, esto es, se procede a la asignación dinámica de canales. Su banda de trabajo está muy próxima a la del sistema celular digital GSM (900 megahertz). Aunque los equipos construidos por diferentes fabricantes basados en este estándar no sean a menudo compatibles, se espera que para final de 1996 pueda haber 2,7 millones de teléfonos de este tipo en el mundo.

La carencia de un número suficiente de canales que padecían los primeros teléfonos analógicos provocaba un alto



1. Clasificación de los sistemas de comunicaciones móviles



2. Evolución de los sistemas de comunicación inalámbricos

índice de bloqueo en áreas urbanas. Para subsanar este grave defecto se desarrolló un nuevo sistema, el CT2/CAI (donde CAI designa el radioenlace común). La técnica que emplean es digital y utilizan un acceso al medio del tipo FDMA; cada trama tiene una duración de dos milisegundos e incluye una parte para la comunicación del terminal a la estación base y otra en sentido inverso. Este modo de proceder se conoce por duplexación en la división del tiempo, o TDD. Reporta notables ventajas en el diseño final de los equipos. Este sistema, en que varios usuarios pueden utilizar la misma estación base, es del tipo monocélula/multiusuario. Pero se muestra incapaz de transferir llamadas de una célula a otra, es decir, no admite el procedimiento de traspaso ("handover").

El sistema CT2 surgió en Gran Bretaña en 1987 como una evolución de los sistemas inalámbricos precedentes. Sin embargo, en aquella época aún no se habían definido el tipo de modulación, el tipo de compresión de la información, la forma de acceso al medio ni otros aspectos básicos. Los diseñadores de estos sistemas establecieron algunas especificaciones comunes, pero el grado de libertad de que disponían hacía prever que los futuros equipos no fueran interoperables entre sí, lo que ha ocurrido. Se hizo, pues, necesario definir un conjunto de especificaciones comunes en el radioenlace. Se determinaron así el ancho de banda utilizado por el sistema, de cuatro megahertz entre las frecuencias de 864-868 Mhz, distribuidos en 40 canales FDMA con sus frecuencias portadoras separadas 100 kilohertz, un algoritmo de compresión de voz del tipo ADPCM ("Adaptive Differential Pulse Code Modulation") a 32 kilobits por segundo y una potencia máxima radiada de móvil a estación base o a la inversa de 10 megawatt.

Las aplicaciones previstas para este sistema se centran en el entorno residencial, de oficinas y de tipo público o telepunto. CT2 es el sistema que se ha propuesto como estándar para el acceso público telepunto, aunque en esta versión básica sólo permite realizar llamadas. En Canadá se ha desarrollado el CT2+CAI, que representa una mejora sustancial en cuanto a las gestiones de movilidad del sistema CT2; reserva algunos de los 40 canales para la gestión de ciertos servicios, como el de mantener un registro de localizaciones de usuario, actualizaciones de su localización y búsqueda, lo que permite el envío y recepción de llamadas.

Veamos ahora de forma más pormenorizada el sistema DECT, cuyas normas aprobó el Instituto Europeo de Estándares en Telecomunicaciones (ETSI). Se trata de un sistema de segunda generación para comunicaciones inalámbricas y del tipo multicélula/multiusuario. Representa un notable avance sobre los que le precedieron. Además, permite las funciones de traspaso y la selección de canales disponibles es siempre dinámica. En cada momento de la comunicación se asigna el mejor canal posible y no sólo al inicio de la llamada. Su utilización está prevista en el entorno doméstico, telepunto, centralitas PBX sin hilos (negocios) y como medio alternativo del bucle de abonado (acceso vía radio).

La estructura en niveles del estándar DECT sigue el modelo de referencia para la interconexión de sistemas abiertos (MARISA). De hecho, los cuatro primeros niveles del sistema DECT corresponderían a los tres primeros de MARISA. Cada uno de estos niveles tiene asignada una funcionalidad en el sistema global; los niveles más altos solicitan la funcionalidad residente de los niveles más bajos. Además del nivel físico, el teléfono inalámbrico digital europeo dispone, en su plano de gestión, de control de acceso al medio (MAC), control de conexión de datos (DLC), capa de red (NL) y otras capas superiores.

Pero no se acaban con ésas las características técnicas. Podemos incluir, en efecto, la compresión de la información mediante el algoritmo ADPCM a 32 kbits y su naturaleza multiportadora (10 portadoras) con una anchura de banda de 20 Mhz entre 1880 y 1900 Mhz. A cada portadora se asocian 12 canales de la estación base al terminal y otros 12 en sentido inverso de una duración total de 10 milisegundos. La técnica de acceso es TDMA/TDD, lo que permite disponer de un total de 120 radiocanales bidireccionales.

El espacio entre portadoras es de 1728 megahertz).

Otro aspecto importante es la diversidad de antena. En el sistema DECT se incorpora la diversidad espacial en antenas mediante la utilización de dos antenas en las estaciones base, permitiendo que los portátiles que se mueven lentamente (caminando, por ejemplo) vean amortiguadas las interferencias en beneficio de una mayor capacidad.

El DECT utiliza funciones de cifrado, mediante unos algoritmos criptográficos que lleva incorporados, para conseguir la autentificación mutua, entre el terminal y la estación base que le da servicio, de manera que sólo puedan emplearse los terminales autorizados y las estaciones base del sistema. Contiene, además, otros algoritmos de cifrado simétricos para preservar la privacidad de las comunicaciones.

El DECT es un estándar europeo de comunicaciones sin hilos que, gracias a su bajo coste, puede ofrecer un amplio espectro de servicios. Se prevé su aplicación en entornos donde las células sean muy pequeñas (picocélulas).

El desafío más importante en la planificación de los sistemas del futuro reside en determinar qué servicios irán por ellas. En Europa se ha emprendido el desarrollo de los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación. El exponente visible es el sistema móvil universal de telecomunicaciones, o UMTS, que se propone unificar los términos celular, sin hilos, acceso local vía radio, redes locales vía radio, radio móvil privada y búsqueda. La idea es ofrecer en cualquier lugar el mismo tipo de servicio, con la única limitación de que las velocidades disponibles pueden depender del entorno y de las condiciones de carga del sistema. Deberán coexistir varios operadores en esta red; la arquitectura de las células será mixta (pequeñas y grandes) y con capacidad para ofrecer servicios multimedia.

En este contexto, el sistema DECT debería crecer en los entornos ya dichos y sobre todo en el de reemplazar al bucle de abonado hasta la central local. Con el estudio y la disposición de nuevas antenas en sus estaciones base y en los terminales, la aplicación de técnicas de ecualización y ubicación de repetidores, el sistema DECT podría asumir el segmento de mercado de comunicaciones vía radio de bajo coste en áreas densamente pobladas, dejando para los sistemas celulares la cobertura de áreas mayores. Otros campos de desarrollo pueden venir de la combinación de canales para ofrecer velocidades más altas, dadas la posibilidad de asignación dinámica de canales y la flexibilidad para ofrecer nuevos servicios que presenta el DECT.

En Europa se están explotando los sistemas de segunda generación cuyos exponentes más notables son el GSM en comunicaciones celulares y el DECT en comunicaciones sin hilos. Se está trabajando en la eventual interconexión entre ellos, se avanza en la definición y especificación del UMTS dentro de ETSI bajo la cobertura de diferentes proyectos europeos como RACE, ATDMA, CODIT y otros.

J. L. Melús Moreno
Depto. Matemática Aplicada y Telemática
Universidad Politécnica de Cataluña

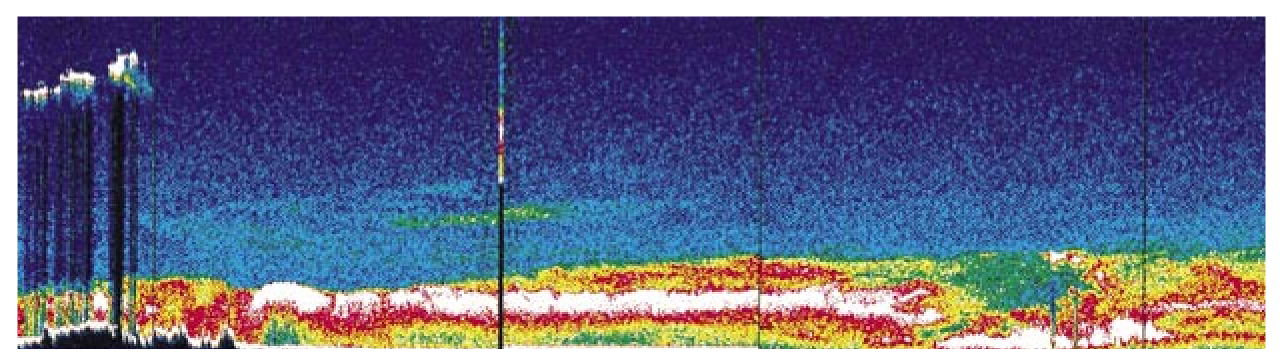
Contaminación sin fronteras

Los sulfatos causan la acidificación y la niebla química, densa y amarilla, que llamamos “smog”. En ninguna parte se han observado con más interés que en Europa, donde los bancos de pesca siguen decreciendo y las cortezas de los árboles disolviéndose a causa de la lluvia ácida, pese a que las emisiones de sulfatos se han reducido en un 30 por ciento desde el año 1980.

Las imágenes de la distribución de contaminación ayudan a los apesadumbrados europeos. La aplicación del lidar —un sistema de obtención de imágenes similar al del radar, que emplea los ecos de un haz láser en vez de radioondas— reveló un enorme penacho de sulfatos que se extiende desde la costa oriental norteamericana hasta Europa. Esa prueba sirvió para demostrar la falsedad de la creencia de que los compuestos de azufre producidos en los EE.UU. precipitaban en forma de lluvia antes de cruzar el Océano Atlántico.

Hasta que se empleó el lidar, los profesionales de las ciencias de la atmósfera sólo disponían de modelos teóricos de ordenador para seguir el movimiento de los aerosoles sulfatados. El lidar ha observado el agujero de ozono en la Antártida. Otro lidar ligeramente modificado podrá permitir la vigilancia de los niveles de ozono global. El lidar podría iniciar una nueva era de teledetección desde el espacio.

Brenda DeKoker



La bruma de aerosol de distintas intensidades **(blanco, azul, rojo)** ***se extiende desde Washington, D.C.*** **(borde izquierdo)** ***a lo largo de casi 2500 kilómetros sobre el Atlántico*** **(borde derecho)**

Taller y laboratorio

Shawn Carlson

Exploremos los enlaces químicos

Si el universo no se deshace y se dispersa en el infinito lo debemos a los enlaces moleculares. Tras éstos se encuentra todo lo que vemos, oímos o tocamos. Absolutamente todos los procesos vitales, de la respiración a la reparación del ADN o la reproducción, tienen lugar merced a la interacción entre las moléculas. Evidentemente, conocer la intensidad y la naturaleza de esos enlaces es vital para la ciencia. Mediante el dispositivo que aquí se describe podrá el lector llevar a cabo alguna investigación original en torno a la naturaleza química de la Creación.

Cuando las moléculas entran en interacción, se rompen los enlaces antiguos y se forman otros nuevos para generar distintas especies químicas. Si, en conjunto, las moléculas nuevas están trabadas con mayor fuerza que las antiguas, se emite calor y aumenta la temperatura de la solución que contiene las moléculas reactivas. Si los nuevos enlaces son menos fuertes, se absorbe calor y baja la temperatura. La medición del flujo calorífico aferente o eferente de esas interacciones químicas suministra información acerca de tales enlaces; por ejemplo, sobre la cantidad de energía necesaria para mantener unidas las moléculas.

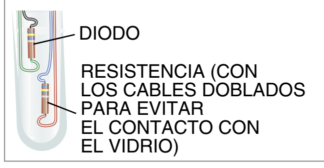
La técnica de medición, llamada calorimetría de dosificación, requiere un equipo muy sencillo. Introduzca tres tubos de ensayo en otros tantos vasos de café de estireno y, con suavidad, envuelva los tubos con aislante. Este basta que sea una espuma aisladora o papel en tiras finas. Rotule los vasos A, B y C. En A y C tendremos las distintas sustancias químicas objeto del ensayo (material de ensayo) disueltas en solución. En B tendremos exactamente la misma cantidad de solución que en A, pero sin el material de ensayo. Necesitará también tres tapones de caucho; dos con dos orificios de 3 mm y uno con un orificio de 3 mm de diámetro. Algunos de los materiales de ensayo con los que probar inicialmente son soluciones de bicarbonato sódico y vinagre o de agua azucarada concentrada y vinagre. Cuando en A introduzca un poco del contenido de C, cambiará la temperatura de A. Un termograma, o representación gráfica de la energía total generada en función de la concentración de moléculas C en A, muestra los resultados.

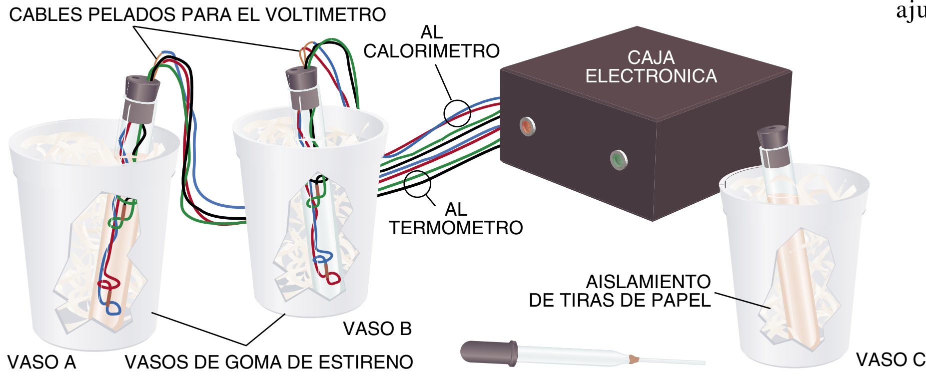
Para medir y controlar la diferencia de temperatura necesitamos dos circuitos compuestos de varias resistencias y amplificadores operacionales. Uno de los circuitos es un termómetro sensible, que detecta los cambios de temperatura que ocurren en A durante la reacción. Unas pequeñas resistencias actúan entonces como calentadores que compensan la diferencia de temperatura, elevando la temperatura de A o B según el caso. El segundo circuito, el calorímetro, mide la cantidad de calor cedido por las resistencias, que es igual a la cantidad de energía generada o absorbida durante la reacción.

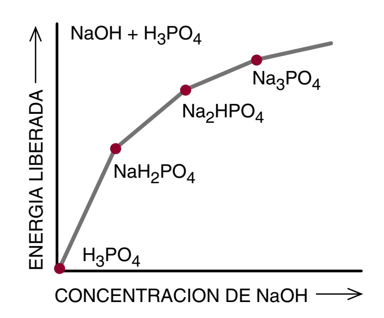
Los diodos constituyen los componentes clave del circuito termométrico. Cuando uno de los diodos conduce corriente, entre sus bornes aparece una tensión de unos 0,7 volts; el valor exacto depende de la temperatura. La tensión disminuye unos dos milivolts por cada aumento de temperatura del orden de un grado Celsius; aproximadamente 40 veces la señal que produce un termopar, que es el dispositivo habitual para registrar la temperatura. En efecto, el termómetro de diodos puede distinguir unas diferencias mínimas, de hasta sólo 0,01 grados C.

Compre un paquete de diodos tipo 1N914. Elija dos como sondas térmicas. Estañosuelde unos 45 cm de hilo conductor a cada borne y aísle el cable al descubierto con esmalte de látex. Estos se conectan a un amplificador instrumental, el corazón de nuestro termómetro, que es un potente circuito integrado, fácilmente conectable.

El termómetro primero hay que ajustarlo a cero. Coloque ambos







1. La calorimetría de dosificación mide la fuerza de unión de los enlaces químicos. El termograma (gráfico) *muestra la formación de distintos compuestos químicos conforme se añade NaOH a* H_3PO_4

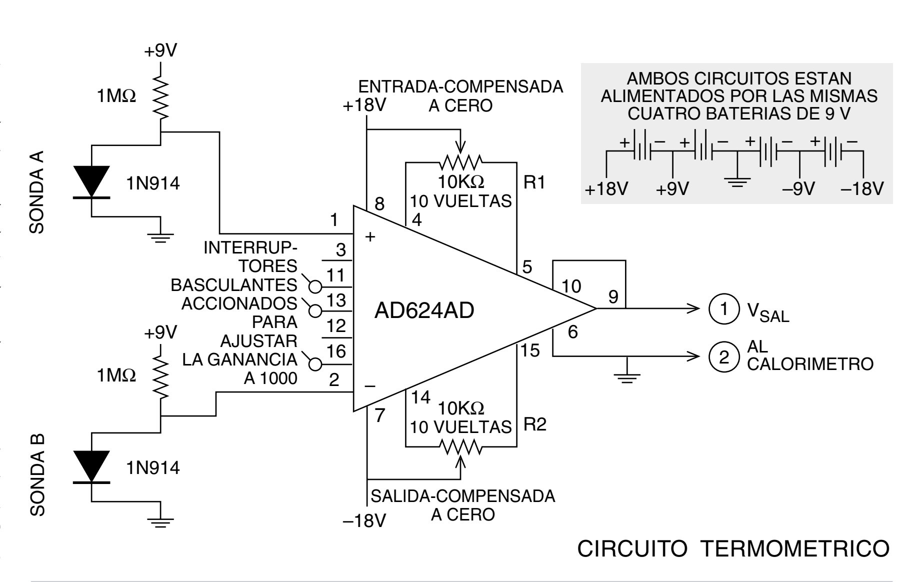
diodos en sus respectivos tubos de ensayo. Cierre los tres interruptores basculantes para ajustar a 1000 la ganancia del amplificador. Con un voltímetro ajuste la resistencia rotulada R1 hasta que la tensión en la patilla 9 dé una lectura cero. Abra los interruptores basculantes y ajuste R2 hasta que la tensión en la patilla 9 vuelva a ser cero. Cierre de nuevo los interruptores para restablecer la ganancia a 1000.

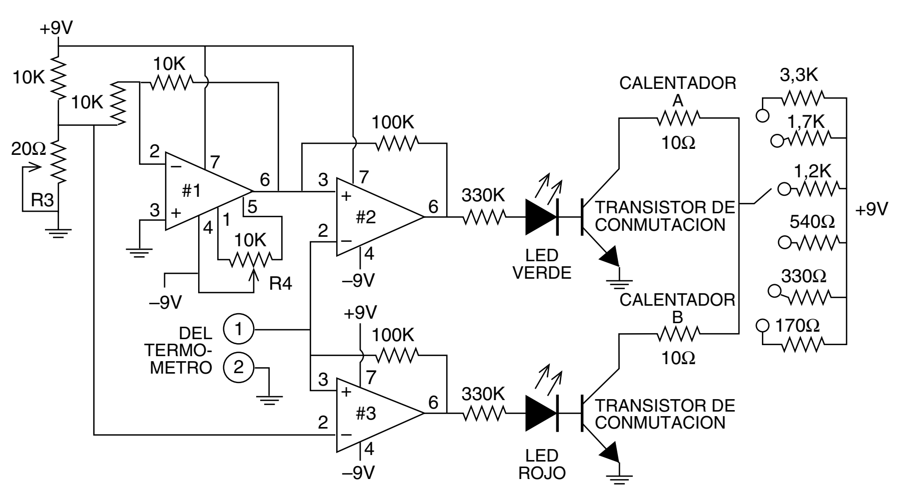
Lo siguiente es construir el circuito calorimétrico. La resistencia R3 fija la sensibilidad. Con ayuda de un voltímetro, ajuste R3 hasta que la tensión leída en la patilla 2 del amplificador operacional 3 sea de 10 milivolts. A continuación ajuste R4 hasta que la lectura en la patilla 3 del amplificador operativo 2 sea de –10 milivolts. Si los diodos emisores de luz (LED) se encienden cuando no se están mezclando sustancias, emplee R3 para aumentar la tensión en la patilla 2 del amplificador operativo 3 hasta que permanezcan apagados.

Los calentadores más sencillos posibles se hacen con resistencias de 10 ohms y 1/4 watt. Necesitará dos, uno para A y otro para B. Estañosuelde cable de cobre de la galga 20 a cada uno y aísle eléctricamente los conductores con dos capas de esmalte de látex. Doble los cables de modo que empujen cada resistencia hacia el centro de su tubo de ensayo. Deseará aislarlos también térmicamente. Para ello compruebe si en la ferretería de su barrio se vende algún producto hecho de una solución de caucho que se solidifique formando un revestimiento aislante.

En cada tubo de ensayo, pase los conductores de la resistencia por el mismo orificio del tapón (el otro orificio es para introducir los materiales de ensayo). Coloque la resistencia a unos seis milímetros del fondo del tubo de ensayo. Rellene el orificio con silicona de acuario. Por último, pele y estañosuelde los conductores por encima de los tapones dejando al aire los empalmes. (Los diseños de otros calentadores, adecuados para moléculas orgánicas y corrosivos fuertes, aparecen en la página World Wide Web de la Sociedad de Científicos Aficionados.)

Si la temperatura de A baja tan sólo 0,01 grados C cuando se añade el material C, el circuito encenderá el LED verde del circuito calorimétrico. Asimismo, pasará una pequeña corriente por el calentador que calentará levemente el tubo de ensayo A. Cuando A vuelve a alcanzar la temperatura de C, el circuito apaga





2. Estos dos circuitos son el fundamento de nuestro experimento. El circuito termométrico detecta variaciones mínimas, de hasta sólo 0,01 grados Celsius. El circuito calorimétrico, que emplea amplificadores operacionales 741, mide el calor generado o absorbido durante la reacción

el calentador y el LED a la vez. Con un cronómetro mediremos el tiempo que el LED permanece encendido. Esta medición, junto con la lectura de la tensión en la resistencia, permite calcular la energía necesaria para devolver a A su temperatura original. Si los tubos de ensayo están bien aislados, la cantidad en cuestión será exactamente la misma que la energía absorbida por los enlaces moleculares.

Si sube la temperatura de A, se enciende el LED rojo. El calentador de B se activa así hasta que B y A vuelven a tener la misma temperatura. La energía necesaria para elevar la temperatura de B hasta la de A es la misma que la energía liberada por las interacciones químicas dentro de A. Para asegurar que A y B mantienen siempre volúmenes iguales, deberemos agregar, tanto en A como en B, la misma cantidad de solución procedente de C. Pero como B no contiene el material crítico, el añadirle la sustancia no liberará ninguna energía química.

Para trasegar productos químicos desde un tubo de ensayo hacia el otro, precisaremos un cuentagotas médico modificado. Inserte dentro de éste un tubo capilar de 100 microlitros y forme un sello estanco al aire con silicona de acuario. Con un alfiler abra un agujero en la cubeta del cuentagotas. El efecto capilar extraerá de B una cantidad precisa de fluido. Pero tenga cuidado; la cantidad extraída dependerá de la tensión superficial del fluido. Mida la altura hasta la que sube el fluido por el tubo y, comparándola con la marca de 100 microlitros, estime el

volumen de fluido. Al transferir el fluido al tubo A, ponga el dedo sobre el agujerito a la vez que oprime.

Antes de anotar datos, coloque una pequeña cantidad de cada material en el tubo de ensayo A para ver cuál de los LED se enciende. Si es el rojo, pince el voltímetro en el calentador B; si es el verde, píncelo al tubo de ensayo A.

Prepare ya los materiales. El material C debe estar muy concentrado. Para determinar la concentración correcta en A, experimente un poco. Empiece con un décimo de la de C. Debe realizar al menos 30 pasos para llegar al final del termograma (cuando el LED ya no se enciende). Para hallar la cantidad correcta, divida 30 por el número de pasos y multiplique por la concentración original en A. Sumerja los recipientes en agua durante 15 minutos para igualar su temperatura. Finalmente, vierta las soluciones en sus tubos de ensayo.

Para tomar datos, inserte el tubo capilar en C y extraiga la solución. Suéltela en B sin meter el tubo capilar en el fluido. No debe ocurrir nada. Repita la operación, esta vez introduciendo la solución de C en A. Entonces, el LED debe iluminarse y saltar la aguja del voltímetro. Lentamente y sin brusquedades revuelva el vaso A para asegurar una buena mezcla de su contenido. Observe la tensión y el tiempo que permanece encendido el LED. Para una precisión máxima, el LED debe permanecer encendido durante 100 segundos.

La cantidad de energía depositada en calorías es $0{,}2390(V^2/R)\Delta t$, donde V es la tensión en la resistencia de calentamiento, R es la resistencia, en ohms, de ese resistor y Δt es el tiempo, en segundos, que el LED permaneció encendido.

En un termograma, si interactúan todas las moléculas de A, la pendiente de la curva cambiará drásticamente en los extremos. Si sólo interactúa una pequeña fracción, los extremos serán redondeados. Una pendiente variable puede también indicar las concentraciones a las que se forman los distintos compuestos.

Para mayor información acerca de cómo interpretar los termogramas y más indicaciones acerca de este proyecto, puede dirigirse a Society for Amateur Scientist (SAS), 4951 D Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117, o extraiga la información de http://www.thesphere.com/SAS/.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Jugando con quads y quazars

Un amigo mío, G. Keith Still, es un experto en informática que, juntamente con dos jubilados del Ejército, dirige una empresa encargada del control de masas en el estadio de Wembley, en Inglaterra. Sus principales intereses profesionales se refieren a la simulación de la dinámica de masas y al diseño de barreras adecuadas. Pero Still es persona de gran inventiva, y hace poco me hizo saber de un juego que se le ocurrió tiempo atrás.

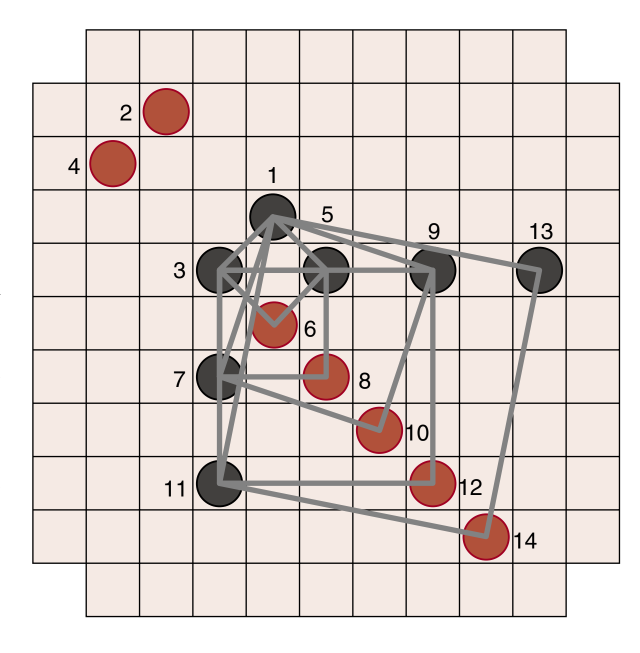
El juego, al que Still ha bautizado Quad, se juega en un cuadriculado de 11 casillas de ancho por 11 de alto, del que se han suprimido las cuatro esquinas. Quedan, pues, 117 escaques disponibles. Los jugadores, dos, cuentan cada uno con 20 piezas llamadas quads, que pueden ser todas rojas o todas negras, y con siete piezas blancas (seis, para partidas más breves), llamadas quazars. Van colocando por turnos uno de sus quads en una casilla desocupada del tablero. El propósito del juego es situar cuatro quads propios en los vértices de un cuadrado. Los lados del cuadrado pueden ser paralelos a los del tablero, o pueden estar al biés [*véase la figura 1, arriba*].

Para cantar victoria, el jugador exclama "¡Quad!" al colocar en posición el cuarto y último vértice de un cuadrado. Sin embargo, a veces a los jugadores se les pasa por alto algún cuadrado formado accidentalmente. Cuando un jugador observa un cuadrado inadvertido, puede cantar "¡Quad!" al principio de su próximo turno. Los cuadrados pasados por alto han de ser rectificados mientras el juego está en curso.

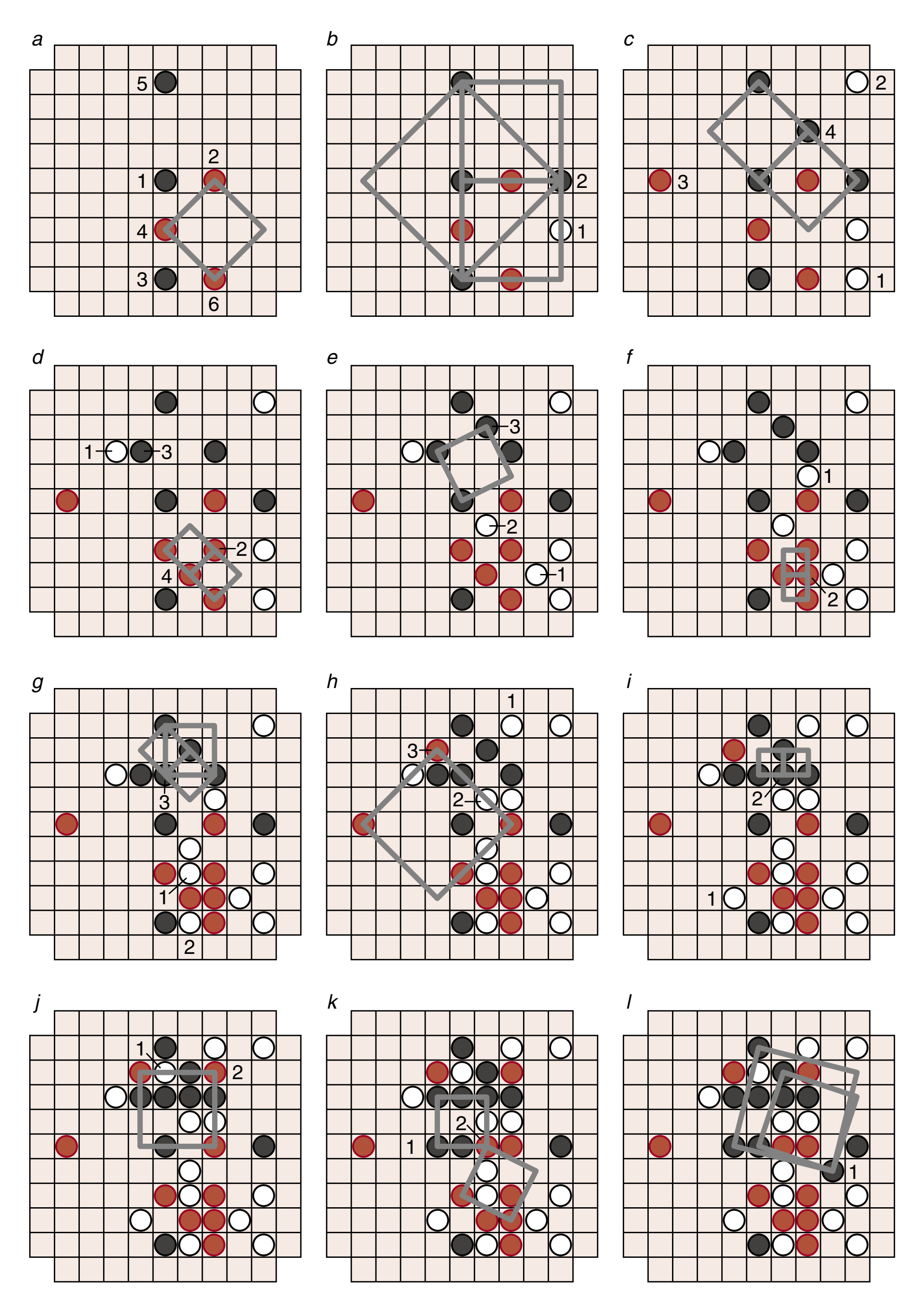
La ilustración inferior de la figura 1 muestra una de las formas en que las negras pueden formar una serie de quads de modo que en cada etapa las rojas se vean obligadas a efectuar cierto movimiento para impedir que las negras ganen en la jugada siguiente. Esta clase de juego obligado no da lugar a partidas muy interesantes, y aquí es donde los quazars desempeñan su papel. Los quazars se utilizan exclusivamente para bloqueos y no cuentan para crear cuadrados. Después de todo, los de ambos jugadores son blancos. Hay varias reglas para jugar los quazars. La primera, el jugador que vaya a usarlo ha de tener el turno. Segunda, podemos jugar tantos quazars como queramos —hasta un límite de siete—, pero es preciso colocarlos antes de jugar nuestro quad. Y es preciso jugar un quad para completar nuestro turno.

Hay, finalmente, dos reglas técnicas. Si en la última jugada de una partida un jugador deja una posición que hubiera forzado una victoria en la próxima jugada en caso de que hubieran quedado quads por jugar, tal jugador es proclamado vencedor. Si la partida acaba sin que ninguno de los jugadores llegue a formar un cuadrado, el jugador que tenga más quazars no jugados gana. Si a los dos les queda el mismo número de quazars, la partida acaba en empate.

Dado que el número de cuadrados que pueden formarse es enorme, Quad puede ser un juego sumamente complejo. Por ejemplo, es bastante fácil hacer una jugada de "cuadrado doble", en la cual se crean simultáneamente dos cuadrados potenciales, entendiendo por cuadrado potencial un cuadrado que tiene ocupados ya tres de sus cuatro esquinas. Es posible que nuestro oponente pueda bloquear en una sola jugada la completación de varios cuadros mediante quazars.



1. Los cuadrados ganadores pueden ser de tamaño arbitrario (arriba). *Por tal razón, las fichas negras pueden efectuar una sucesión de jugadas que, de no haber quazares, mantenga a las rojas a la defensiva* (abajo)



2. Esta partida de ejemplo muestra todos los cuadrados potenciales conforme van surgiendo durante el juego. Los números indican el orden en que se han colocado las fichas en el tablero. Al cabo de 10 jugadas, las rojas se han quedado sin quazars, y las negras ganan, forzando con una jugada un doble cuadrado

Por consiguiente la búsqueda de cuadrados dobles resulta ser una buena táctica, porque obliga a nuestro adversario a consumir sus quazars mucho más rápidamente.

La experiencia demuestra que la colocación de un quad en la casilla central es una jugada de apertura razonable. A partir de ese instante hay que prestar atención, buscando cuadrados potenciales o casualmente terminados dispuestos en orientaciones inesperadas. También hay que estar atento a cuadrados traslapados que pudieran permitir jugadas de cuadrado doble a nuestro adversario. En la figura 2 podemos ver el desarrollo de una partida; los cuadrados potenciales están realzados conforme van apareciendo.

El Quad, si resulta de su gusto, admite buen número de variantes para jugar en distintas circunstancias. A los niños pequeños, por ejemplo, el juego les resulta más manejable en tableros reducidos, en cuyo caso conviene disminuir *ad hoc* el número de quazars (cinco quazars para tableros de 10 por 10, cuatro para los de 9 por 9, y así sucesivamente). Asimismo, si desean ser tres los jugadores que compitan, cada uno debería utilizar sólo cuatro quazars (y por ejemplo, 20 quads las negras, las rojas y, quizá, las amarillas). En el caso de cuatro jugadores, cada uno debería recibir tres quazars, y si fueran cinco o seis, dos para cada uno.

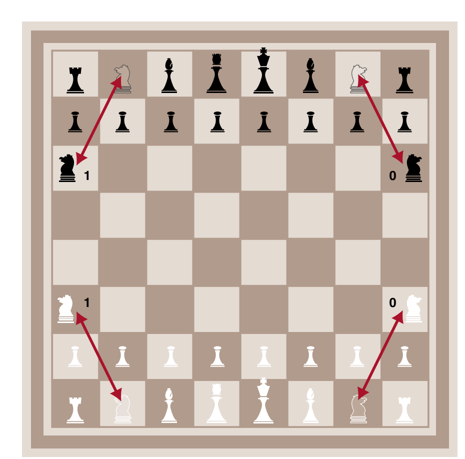
Still describe varios juegos más. El Quad Trek es parecido al juego normal con dos personas, pero los jugadores solamente tienen seis quads y seis quazars. Una vez jugados todos los quads, un turno consiste en elegir un quad de nuestro color y colocarlo en otro sitio. Los quazars pueden jugarse en cualquier momento, como en la versión normal del juego, pero una vez jugados no podemos moverlos por segunda vez. En Quad Duel, cada jugador dispone de quads de dos colores, o de más, incluso, y juega un quad de cada color por turno. El jugador sólo puede cantar "¡Quad!" cuando ha formado un cuadrado con piezas iguales.

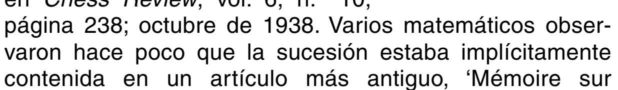
Cada jugador de Quad Rapid recibe seis quads y seis quazars, pudiendo, en cada turno, colocar un quad nuevo o mover uno antiguo. Se juega con los quazars de la forma habitual. En Quad Bridge los jugadores son cuatro, que forman dos parejas. Los jugadores se sientan en torno al tablero, cada uno frente a su socio. Una de las parejas dispondrá de los quads negros, la otra, de los rojos. El juego progresa en el sentido de las agujas del reloj; no está permitido hablar; hemos de averiguar la estrategia de nuestro socio antes de que lo hagan nuestros oponentes. Pero sí está permitido enviar señales, como agitar los brazos, dar golpes con la cabeza contra la mesa o saltar arriba y abajo. Si los lectores dan con otras variantes amenas del juego de Still, no dejen de hacérmelas llegar: podrían tener cabida en "Acuse de recibo."

Acuse de recibo

El artículo de diciembre de 1995 suscitó cierto número de cartas aclarando la historia de la secuencia sin tríos de "Morse-Hedlund" : 0110100110010110...

Jeffrey Shallit, de la Universidad de Waterloo en Ontario, escribió: "En nuestros días, esta sucesión se atribuye al matemático noruego Axel Thue, que se ocupó del problema de la repetición en una serie de artículos que comenzó en 1906. También demostró que la sucesión carecía de traslapamiento, propiedad todavía más extraña. La aplicación al ajedrez fue señalada por vez primera, que yo sepa, en un resumen de Marston Morse en *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 44, n.º 9, pág. 632; septiembre de 1938. Puede verse un comentario jocoso de la aplicación de Morse en 'A mathematician gives an hour to chess', por Donald MacMurray en *Chess Review*, vol. 6, n.º 10, página 238; octubre de 1938. Varios matemáticos observaron hace poco que la sucesión estaba implícitamente contenida en un artículo más antiguo, 'Mémoire sur quelques relations entre les puissances des nombres', por E. Prouhet, en *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, vol. 33, n.º 8, página 225; 25 de agosto de 1851."





I. J. Good, del Instituto Politécnico de Virginia y de su universidad estatal, ha hecho notar que Machgielis (Max) Euwe, campeón mundial de ajedrez de 1935-1937, inventó la misma secuencia en "Set Theory Observations and Chess" en *Proceedings of the Academy of Science Amsterdam*, vol. 32, páginas 633-642; 1929. Y añade: "Este artículo me llevó a inventar (en 1943 o 1944) el 'orden de reflexión' para el código pentádico de los teleimpresores; para mayor detalle, véase mi artículo 'Enigma or fish' en *Codebreaker*, recopilación de F. H. Hinsley y Alan Stripp (Oxford University Press, 1993). En la actualidad este código se denomina código Gray y fue inventado y patentado independientemente por F. Gray para la conversión de analógico a digital." —*I. S.*

Libros

M.ª Isabel Vicente Maroto, Luis Alonso y Manuel Lozano Leiva

Técnica española

Patentes

PATENTES DE INVENCIÓN ESPAÑOLAS EN EL SIGLO DE ORO, por Nicolás García Tapia. Oficina Española de Patentes y Marcas; Madrid, 1994.

En este libro se recoge un riguroso trabajo de investigación histórica, realizado fundamentalmente en el Archivo General de Simancas, sobre las primeras cédulas de privilegio destinadas a inventores, verdaderas patentes para defender sus intereses, sacadas a la luz por García Tapia. No se trata, pues, de una simple obra de recopilación al uso, sino que el libro desmonta muchas afirmaciones del tipo de las expresadas en la famosa frase "que inventen ellos" y todos sus argumentos se encuentran respaldados por el correspondiente documento, en la línea de trabajo que caracteriza al autor.

La primera edición del libro se agotó rápidamente y ha despertado un gran interés no sólo en España, sino también en Europa y América. Sorprende descubrir que en los comienzos del siglo XVI ya existían cédulas de privilegio para invenciones españolas, a imitación de las de algunas repúblicas italianas —en Florencia y Venecia en 1421 y 1474 respectivamente ya se pusieron en marcha—, pero con un adelanto de muchos años con respecto a los otros países de nuestro entorno. Este hecho debe hacer cambiar la idea que se tenía sobre la inventiva española y la tecnología del Siglo de Oro.

El estudio sobre las patentes españolas se inicia con un privilegio de invención datado en 1522, y se trata de un ingenio de un inventor catalán para que un navío de alto bordo pudiera navegar en tiempo de calma. Es una de las más antiguas concedidas en el mundo, pero la investigación está abierta y podrían aparecer cédulas anteriores, dado el número y la complejidad de los documentos que se conservan en el Archivo General de Simancas. Otras patentes se refieren a invenciones tan asombrosas como buzos, submarinos y hasta una máquina de vapor. Los resultados fueron a veces un éxito y otras un fracaso, pero en muchos campos de la ingeniería se avanzó notablemente.

Entre todos los inventores estudiados en el libro, de formación y extracción social muy diferentes, destaca García Tapia a Jerónimo de Ayanz. Su nombre, y el de otros muchos, ha sido desconocido en España, donde se han divulgado nombres de políticos, militares, pintores o literatos, pero no de científicos o técnicos. En el Archivo de Simancas se encuentra una cédula real, firmada por Felipe III en 1606, otorgando al demandante Jerónimo de Ayanz un privilegio para disfrutar del derecho exclusivo de unas cincuenta invenciones, con dibujos y explicaciones de máquinas e instrumentos técnicos tan dispares como balanzas de precisión, hornos, campanas de bucear, o procedimientos para destilar el agua del mar y beneficiar los minerales. La preocupación de Ayanz por desaguar las minas le llevó a presentar una invención revolucionaria para la época, los ingenios de vapor, que se adelantaron en un siglo a los que hacia 1700 presentó Thomas Savery. Al estudio de esta máquina de vapor ha dedicado García Tapia trabajos más extensos.

El apéndice con el documento original de la patente de Ayanz, acompañado de su transcripción, puede resultar de gran interés a muchos estudiosos de la técnica, pues las invenciones presentadas pueden dar lugar a trabajos monográficos, dada la variedad de técnicas que trató el polifacético inventor.

La existencia de unos medios técnicos y la necesidad de contar con un plantel adecuado de ingenieros e inventores para mantener un imperio es un hecho evidente. García Tapia contribuye con este libro al conocimiento de la tecnología y su influencia en la materialización de un Siglo de Oro español. Concluye que "en el período comprendido entre 1525 y 1648 España fue la nación que estuvo más cerca de la consecución de una renovación en la ingeniería que, aunque fue rápidamente frustrada por las condiciones sociales, económicas y políticas, dejó un plantel de invenciones útiles que no fueron suficientemente valoradas ni difundidas y que hoy en día tenemos olvidadas". (M. I. V.)

Invención

Y sistema

INVENTION. THE CARE AND FEEDING OF IDEAS, por Norbert Wiener. The MIT Press; Cambridge, 1993.

THE CORRESPONDENCE OF MICHAEL FARADAY. Edición preparada por Frank A. J. L. James. Institution of Electrical Engineers; Londres, 1991-1993. **THE SCIENTIFIC LETTERS AND PAPERS OF JAMES CLERK MAXWELL**. Edición preparada por P. M. Harman. Cambridge University Press; Cambridge, 1990-1995.

THE KEKULE RIDDLE. A CHALLENGE FOR CHEMISTS AND PSYCHOLOGISTS. Dirigido por John H. Wotiz. Cache River Press; Vienna, 1993. **COOPERATION CHEMISTRY. A CENTURY OF PROGRESS**. Dirigido por George B. Kauffman. American Chemical Society; Washington, 1993.

THE TELEPHONE AND ITS SEVERAL INVENTORS. A HISTORY, por Lewis Coe. McFarland and Company Inc.; Jefferson, 1995. **THE PAPERS OF THOMAS A. EDISON. MENLO PARK: THE EARLY YEARS**. Vol. 3. Edición preparada por Robert A. Rosenberg, Paul B. Israel, Keith A. Nier y Martha J. King. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1994.

Sin imaginación no hay ciencia. Sin ciencia no hay técnica. Sobre esas relaciones han lucubrado largamente los epistemólogos. También los científicos. Con especial agudeza, Norbert Wiener (1894-1964), matemático que destacaba por su capacidad para comprender el funcionamiento profundo de las cosas y autor de un manuscrito, *Invention. The care and feeding of ideas*, cuya recuperación ha despertado un justificado interés.

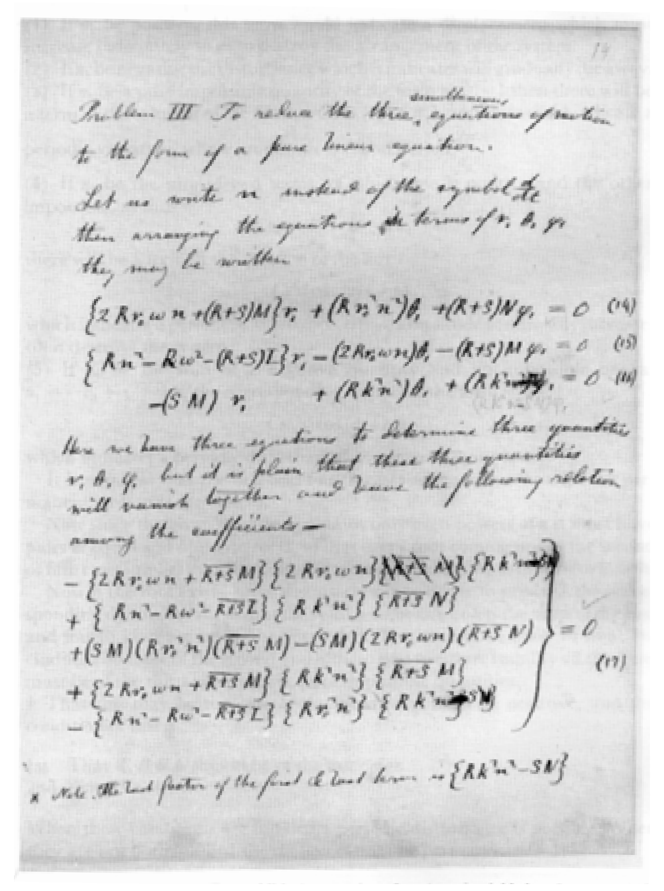
Wiener rechaza que las ideas originales puedan brotar en un contexto asambleario, pero sí necesitan un ambiente predispuesto en lo intelectual y lo técnico. El mismo combinó teoría y praxis inventiva. En los años veinte, Wiener creó un método para evaluar una clase general de integrales mediante el paso de un haz de luz a través de una pantalla y la

posterior medición de la intensidad del haz emergente. Aludimos al integrafo de Wiener, un computador analógico. Dos décadas después recomendó el desarrollo de una nueva clase de máquina: digital, binaria y electrónica, que poseyera además la arquitectura de una máquina de Turing y empleara cinta magnética para el almacenamiento de datos.

Distingue cuatro momentos principales en el proceso de invención. De partida, la idea que fue capaz de crear un ambiente favorable. Deben acompañar a esa intuición las técnicas y materiales aptos para desarrollarla. Ha de existir, asimismo, algún mecanismo de puente entre el intelectual y el artesano. Habla, en definitiva, de tres climas: el de las ideas, el de la técnica y el de la sociedad. Se dará cumplimiento feliz a la invención cuando un cuarto clima, el económico, apueste por ella.

Wiener entiende el clima intelectual como una concatenación de conceptos que van preparando el terreno. Encuentra un ejemplo arquetípico en la teoría estadística de la comunicación, basada en la teoría de la información de Shannon, cuyas raíces hunde en Gibbs y Lebesgue. Las comunicaciones electrónicas portan inevitablemente no sólo la información que queremos enviar, sino también ruido indeseable. Separar el ruido de la información fue siempre un problema correoso. Wiener lo abordó mediante el desarrollo de una teoría matemática de la filtración del ruido, que se aplicó en radares, receptores de radio y teléfonos.

Cierto es que la idea seminal suele presentarse como un accidente feliz e impredecible. No había absoluta necesidad para que Euclides articulara la teoría axiomática de la geometría, ni para que Gibbs introdujera la probabilidad en termodinámica. Estas innovaciones podían haber surgido antes o después. Pero hay procedimientos, así los matemáticos, que constituyen una auténtico vivero para la invención y el descubrimiento. La matemática nos permite establecer lo esencial y quemar lo accesorio, abordar la misma cuestión en campos muy distintos sin implicarnos en ninguno particular. La invención añade al descubrimiento las manos del artesano. La limitación de la eficacia de un invento por la disponibilidad real de materiales y técnicas aparece de forma paradigmática en el estudio del cuaderno de notas de Leonardo da Vinci.


Problem III To reduce the three simultaneous equations of motion to the form of a pure linear equation.

Let us write n instead of the symbol d/dt then arranging the equations in terms of r, θ, φ they may be written

Here we have three equations to determine three quantities r, θ, φ but it is plain that these three quantities will vanish together and leave the following relation among the coefficients —

Hoja manuscrita de Maxwell perteneciente a su trabajo sobre los anillos de Saturno

Aspecto clave en la sociología de la invención es el de la interpenetración entre el elemento puramente artesanal y el elemento puramente científico. Quizás un buen ejemplo de ello, expone Wiener, sea el representado por Michael Faraday y James Clerk Maxwell. Puede el lector adentrarse en los momentos singulares de la inspiración de uno y otro abriendo dos colecciones espléndidas: *The correspondence of Michael Faraday* y *The scientific letters and papers of James Clerk Maxwell*.

Del epistolario de Michael Faraday han aparecido los dos primeros volúmenes, correspondientes a los años entre 1811 y 1849. Todas las cartas, entendidas en sentido amplio para abarcar informes sobre diversas materias, se publican en orden cronológico. En este mazo asistimos a la gestación y el desarrollo de la rotación electromagnética, la licuación de los gases, la inducción electromagnética, el efecto magneto-óptico y el diagmagnetismo.

"Mi educación fue muy elemental, con las cuatro reglas, los rudimentos de lectura y escritura, y poco más." Pero se enfrasca en los libros que le llegan en sus años de aprendiz de encuadernador, entre ellos las *Conversations on Chemistry* de Jane Marcet y un tratado sobre electricidad de James Tytler. Convertido en amanuense y ayudante de Humphry Davy, le acompañó en un viaje por Europa y así entró en contacto con científicos del continente. A Charles-Gaspard De la Rive le comunicaba en carta del 12 de septiembre de 1821: "He observado que las habituales atracciones y repulsiones de la aguja magnética por el cable coyuntor son engañosas; los movimientos no son atracciones ni repulsiones, ni resultado de cualesquiera fuerzas atractivas o repulsivas, sino una fuerza del cable que, en vez de acercar el polo de la aguja hacia éste, o alejarlo, se empeña en provocar que gire en círculo." De Jean Nicolas Pierre Hachette recibía la siguiente nueva en abril de 1823: "...Me he enterado de sus nuevos experimentos sobre la reducción de gases al estado líquido. Un compendio de esos experimentos, que se encuentra en una revista inglesa, ha sido objeto de la comunicación realizada el pasado lunes por M. Arago, a la Academia." Con Eilhard Mitscherlich discute sobre el benceno, descubierto en 1825 por Faraday con el nombre bicarbureto de hidrógeno.

La década de los treinta fue quizá la más productiva. Ahondó en la inducción electromagnética: el movimiento de un flujo magnético gene-ra un voltaje eléctrico perpendicular al flujo (ley de Faraday). Se lo anunció en diciembre del mismo año a Hachette, carta que éste leyó ante la Academia de París. La interpretación incorrecta de esta carta permitió que otros, en concreto Leopoldo Nobili y Vincenzio Antinori, repitieran algunos de los experimentos de Faraday y los publicaran antes que él.

Para explicar el paramagnetismo y el diamagnetismo recurrió a la tendencia de las líneas de fuerza a atravesar cuerpos distintos. La justificación de estos fenómenos magnéticos

se convirtió en tema central de la obra de Maxwell, de cuyo epistolario y manuscritos han aparecido también los dos primeros volúmenes. En sus anotaciones autobiográficas de 1873, recordaba su temprana afición hacia la geometría, cuando hizo sus incursiones en las curvas cartesianas y las envolventes. Sus primeras aproximaciones en física se relacionaron con los efectos cromáticos. También se sentía atraído por la instrumentación científica, que cristalizaría más tarde en el diseño de un "platómetro", un aparato para medir las áreas de las figuras trazadas sobre un plano. Mucho tuvo que ver en esas inclinaciones James David Forbes, profesor de filosofía natural en la Universidad de Edimburgo. Otros maestros suyos fueron William Hamilton, que le enseñó lógica y metafísica, y Philip Kelland, docente de matemática.

A esa época estudiantil de Edimburgo pertenece el trabajo "Sobre el equilibrio de los sólidos elásticos". De la teoría matemática de la elasticidad se habían ocupado Navier, Poisson y Cauchy, que Maxwell conoce, aunque su fuente principal fue Stokes, de quien extrae su modelo matemático básico, y un artículo de Lamé y Clapeyron, que aportaron diversos casos por él abordados: compresión de vasos esféricos y cilíndricos, torsión de un cilindro y teoría de los experimentos de Oersted sobre compresión del agua.

En 1854 remitía a William Thomson (Lord Kelvin) las "confesiones de un recién llegado a la electricidad", es decir, sus especulaciones sobre electricidad y magnetismo, cuyos fundamentos asentó, siquiera de forma provisional, en el artículo "Sobre las líneas de fuerza de Faraday". Anuncia su compromiso con la teoría de Faraday-Thomson de las "líneas magnéticas de fuerza" y el "campo magnético", donde propone una teoría del electromagnetismo basada en la distinción entre "magnitudes" eléctricas y magnéticas (que actúan a través de las superficies) e "intensidades" (que actúan a través de líneas).

En carta a Lichtfield en julio de 1856 revela que el centro de su interés es ahora la estabilidad de los anillos de Saturno: entender cómo puede girar un fluido en un anillo permanente y por qué dicho aro no es un cuerpo rígido. Maxwell dividió un primer ensayo en dos partes, la primera referida al movimiento de un anillo rígido y la segunda al movimiento de un anillo fluido o un anillo formado por partículas inconexas. El aparato matemático descansa



Friedrich August Kekulé (1829-1896)

en la teoría del potencial, el teorema de Taylor y análisis de Fourier. Concluirá, con Laplace, que un anillo sólido uniforme sería inestable.

¿Qué pasaba con un anillo fluido? Si permanecía en reposo, el aro entero colapsaría en satélites. Pero podría mantener la estabilidad si se hallaba en movimiento. Cualquier alteración produciría ondas de fluido en el plano del anillo. Obtuvo una ecuación bicuadrática para la velocidad angular (la relativa a la rotación del anillo). La solución de esta ecuación forma el núcleo argumentativo de la segunda parte del ensayo. Llega a la conclusión de que una serie duradera de alteraciones determinaría que los anillos exteriores se extendieran cada vez más lejos del planeta, en tanto que los interiores se le acercarían crecientemente. Maxwell corrigió ese primer ensayo en su memoria *Sobre la estabilidad del movimiento de los anillos de Saturno*, para determinar que el sistema constaba de anillos concéntricos: "hemos llegado a una pluralidad de anillos con velocidades angulares independientes".

En carta a Stokes en mayo de 1859 delimita los fundamentos de su teoría cinética de los gases, que vertebrará en las "Ilustraciones de la teoría dinámica de los gases". Abordaba el estudio del movimiento de las partículas cual si se tratara de un ejercicio de mecánica. Tras los pasos de Clausius, buscó la confirmación en la ciencia molecular. La descripción de Maxwell de los procesos físicos mediante una función estadística constituyó una innovación importante.

La base de su teoría física del campo electromagnético fue un modelo de "vórtices moleculares" orientados a lo largo de líneas del campo magnético. Maxwell creó su propia teoría mecánica del éter. Calculó la velocidad de ondas elásticas transversales en un éter celular, aceptando que las propiedades elásticas del éter tenían correlatos electromagnéticos. Estableció la "proximidad entre los dos valores de la velocidad de propagación de los efectos magnéticos y el de la luz". De lo cual infirió que la luz consta de ondulaciones transversales del mismo medio que causa los fenómenos eléctricos y magnéticos. Para completar su teoría de las líneas físicas de fuerza pergeñó un tratamiento cuantitativo del efecto Faraday en términos de la rotación de los vórtices moleculares. Maxwell había establecido las bases de su teoría electromagnética de la luz.

Entre 1862 y 1873, sus años de madurez, se concentra, por un lado, en el campo electromagnético y la teoría electromagnética de la luz, y, por otro, en la física molecular estadística. La teoría de campos de Maxwell se apoya en la noción de carga. En el *Tratado sobre electricidad y magnetismo* presentó su teoría del campo electromagnético como una representación coherente de la propagación de las fuerzas electrodinámicas. El *Tratado*, que se divide en cuatro partes (electrostática, electrocinemática, magnetismo y electromagnetismo), se entreteje con el hilván de cuatro ideas matemáticas esenciales: cuaterniones (conceptos vectoriales), teoremas integrales, topología y el método de Lagrange-Hamilton de dinámica analítica.

De la invención y descubrimiento en física a la invención y descubrimiento en química. Podemos ahora escoger, sin miedo a equivocarnos, las figuras de Friedrich August Kekulé, por lo que se refiere a la química orgánica, y la de Alfred Werner, por lo que concierne a la inorgánica. Ambos dijeron inspirarse, además, en un estado de imaginación máxima, el sueño. Dos libros de múltiple autoría se le recomiendan al lector, *The Kekulé riddle* y *Coordination chemistry*.

El 11 de marzo de 1890, químicos de los cuatro puntos cardinales se congregaron en Berlín para conmemorar las bodas de plata de la estructura cíclica del benceno. Ese homenaje dio en llamarse la *Benzolfeier* o *Benzolfest*. Durante el mismo, Kekulé informó que había

concebido en sueños la estructura cíclica del benceno y su teoría de las cadenas de carbono. ¿Era cierto?

Kekulé, formado en la escuela de Justus von Liebig, enseñó en Gante desde 1858 hasta 1867. Allí redactó su primera nota sobre la estructura del benceno, que mandó a la Société Chimique de París, donde Wurtz la leyó el 27 de enero de 1865. En la sesión ordinaria del 11 de mayo de 1865 de la Academia de Bruselas, el propio Kekulé expuso unas "Notas sobre algunos productos de sustitución del bencino", que constaban de una parte experimental y una introducción teórica correspondiente a la composición del núcleo bencénico, donde se incluye el hexágono regular, pero no los enlaces simples y dobles. Al año siguiente Kekulé confirmó su teoría y publicó los resultados experimentales en los *Annalen* de Liebig: "Investigaciones sobre los compuestos aromáticos".

En sus clases, empleaba modelos moleculares de bolas y alambres, que, al darlos a la imprenta, transformó en círculos y rayas. Un átomo monovalente era un círculo, y su valencia se representaba por una raya; un átomo divalente, un círculo con dos rayas en ángulo de 180 grados; un átomo trivalente, un círculo con tres rayas en ángulo de 120 grados. Las distancias entre dos extremos eran siempre las mismas. De ese modo podía construir también enlaces dobles. Dispuso las cuatro valencias del carbono en ángulos tetraédricos.

La versión final de la fórmula de Kekulé apareció en un artículo que Albert Ladenburg presentó ante la Sociedad Alemana de Química en 1869. Antiguo colaborador de Kekulé, se mantuvo leal a su maestro y le transfirió todo el honor: "Hace unos años tuve la oportunidad de señalar al profesor Kekulé que la fórmula gráfica del benceno dada por él es incompatible con la hipótesis (de la equivalencia de los seis átomos de carbono)." Aunque no la idea de la estructura del benceno, la fórmula de Kekulé se debe en justicia a Ladenburg.

La teoría de la valencia constante de Kekulé, flexible y fecunda en el dominio de la química orgánica, resultaba una auténtica camisa de fuerza cuando se aplicaba a los compuestos inorgánicos. (Para la tesis antagónica, la de valencia variable, un elemento dado podía exhibir una valencia en un compuesto y una valencia diferente en otro compuesto.) El propio Kekulé admitía las limitaciones de la valencia constante. Pero se empecinó en el error y lo agravó al introducir las nociones de "compuestos atómicos" y "compuestos moleculares". En la medida en que las fuerzas que actúan entre moléculas se suponen más débiles que las fuerzas que actúan entre átomos, los "compuestos moleculares" deben ser menos estables que los "compuestos atómicos". Pero ese criterio de estabilidad fracasaba en las aminas metálicas y otros compuestos de coordinación.

Y aquí, en la química de coordinación, entra Werner. Pero antes de abordar su teoría vale la pena detenerse en su rival mejor estructurada, la teoría catenaria de Blomstrand-Jorgensen. Christian Wilhelm Blomstrand, profesor de Lund, se esforzó por reconciliar el viejo dualismo de Berzelius con las novísimas teorías unitaria y de tipos. Sophus Mads Jorgensen, que enseñó química en Copenhague, se dedicó a los compuestos de coordinación del cobalto, cromo, rodio y platino.

Ilustración de la solicitud de patente del teléfono firmada por Alexander Graham Bell

Blomstrand se opuso al dogma de la valencia constante. Sugirió que podían enlazarse cadenas de —NH_2—, análogas a las cadenas —CH_2— de los hidrocarburos. El número de aquéllas asociadas con el metal, es decir, la longitud de la cadena, dependía del metal y de su valencia. Jorgensen aportó datos sobre la diferente reactividad de átomos y grupos. Los átomos de halógenos que no precipitaban inmediatamente con nitrato de plata se denominaron "cis" y supuso que se enlazaban directamente con el átomo de metal; los átomos de halógenos que precipitaban inmediatamente con nitrato de plata se denominaron "trans" y supuso que establecían enlaces a través de las cadenas de —NH_2—. Estas dos clases de enlaces recibieron una mejor explicación en la teoría de la coordinación de Werner.

Cierta noche de finales de 1892 Werner se despertó a las 2 de la madrugada con la solución de la constitución de "compuestos moleculares". Se levantó de la cama y escribió frenéticamente sin interrupción. A las 5 de la tarde del día siguiente había terminado su "Contribución a la constitución de los compuestos inorgánicos". A sus 26 años ponía en cuestión la teoría de la valencia constante de Kekulé y la teoría catenaria de Blomstrand-Jorgensen, cortando el nudo gordiano que durante décadas había llenado de confusión la química inorgánica estructural.

En su teoría revolucionaria, postuló dos tipos de valencia: *Hauptvalenz*, valencia primaria o ionizable, y *Nebenvalenz*, valencia secundaria o no-ionizable. Para Werner, todo metal en un particular estado de oxidación, esto es, con una particular valencia primaria, presenta también un número de coordinación definido, vale decir, un número fijo de valencias secundarias que debe satisfacerse. Ahora bien, mientras que las valencias primarias o ionizables pueden satisfacerse sólo por aniones, las valencias secundarias o no ionizables pueden satisfacerse también por moléculas neutras que contienen átomos donadores. Entre los ligandos típicos que pueden coordinarse con el átomo central figuran el amoniaco, las aminas orgánicas, el agua, los sulfuros orgánicos y las fosfinas. Las valencias se-

cundarias se ordenan espacialmente en torno al átomo metálico central, y el agregado combinado forma un "complejo", que suele existir como una unidad discreta en solución.

Transcurrieron bastantes años antes de que los químicos se decidieran por la coordinación. El impulso lo dio, en 1916, G. N. Lewis. Explicó que la naturaleza de los enlaces no ionizados resultaba de la compartición de dos electrones. Los electrones podrían aportarlos los dos átomos enlazados, uno cada uno, o ambos el mismo átomo. La química de coordinación constituye uno de los campos más activos de investigación en la actualidad. Los agentes de coordinación se emplean en el secuestro y remoción de iones metálicos, en tintes, tenerías, electroposición, catálisis y múltiples procesos industriales más. Alcanzan, asimismo, un destacado interés bioquímicos: la vitamina B_{12} es un compuesto de coordinación del cobalto; la hemoglobina, un compuesto de coordinación del hierro; la hemocianina, un compuesto de coordinación del cobre, y la clorofila un compuesto de coordinación del magnesio.

Por último, dos obras representativas de la invención técnica: *The telephone and its several inventors* y *The papers of Thomas A. Edison. Menlo Park: the early years*. En la primera se pasa revista a la historia de un medio de comunicación cuyas ramificaciones han transformado el mundo. En la segundo se recogen los esquemas, patentes, cartas e intereses comerciales del más fecundo de los inventores en sus años de mayor creatividad.

El día 7 de marzo de 1876 la Oficina de Patentes de Estados Unidos concedió a Alexander Graham Bell lo que puede considerarse la patente más rentable de la historia. Pero el mismo día en que Bell rellenó su solicitud, Elisha Gray entregaba un "caveat" (un documento provisional de concesión de patente). Esta coincidencia desencadenó un debate sobre la primacía de la invención del teléfono. Antes, a comienzos de los años sesenta, Johann Philipp Reis había desarrollado un esbozo del ingenio, pero su reclamación frente a Bell se perdió en la sala de justicia.

Ese año de 1876 fue histórico para los norteamericanos. Se conmemoraba el centenario de su independencia y se celebraba la Gran Exposición de Filadelfia. Bell se las ingenió para terminar un modelo operativo de su teléfono y exhibirlo en la Muestra. El transmisor empleado por Bell en tan histórica ocasión ("Mr. Watson, venga aquí por favor") no fue de su propia invención. Se trataba de un transmisor de contacto líquido descrito por Gray, en el que se humedecía una aguja en un cuenco de agua devenida conductora mediante la adición de algo de ácido. La aguja estaba unida a un diafragma que provocaba su vibración de acuerdo con la emisión de voz que la percutía. La vibración de la aguja alteraba la resistencia del circuito y se establecía la corriente ondulatoria necesaria para la transmisión del habla. Los primeros teléfonos constaban de una sola unidad magnética que operaba como receptor y emisor.

El que Gray no diera un paso más y solicitara la patente tiene su explicación. El futuro, suponíase, estaba en el telégrafo. Eran tiempos de máximo esplendor del telégrafo de Morse. Cualquier ingenio que prometiera aumentar la capacidad de mensaje de las líneas resultaba de gran valor para el inventor. Bell andaba tras lo mismo —incrementar la capacidad transmisora de los circuitos telegráficos—, aunque no se le escapó el enorme potencial del teléfono.

Hubo un episodio feo en la controversia. Bell tuvo acceso al caveat de Gray y pudo así incorporar en su solicitud una reclamación sobre el método de resistencia variable de la transmisión del habla. La apostilla sobre resistencia variable aparece en el margen de la solicitud de patente. Buena parte de la invención del teléfono debe atribuirse, además, a Thomas A. Watson, su colaborador. Bell adivinó las posibilidades de la transmisión eléctrica del habla, pero fue Watson quien transformó la intuición en términos prácticos. Watson desarrolló el "teléfono magnético", que empleaba una solenoide que operaba en el campo de una imán permanente. Este fue el prototipo de los receptores del teléfono usados hasta nuestros días. Funcionaba también como transmisor. El modelo perfeccionado de receptor-transmisor lo patentó Bell en 1877. Asimismo, para resolver el problema de la identificación de los abonados y la comunicación de éstos con la central, Watson diseñó el llamador "polarizado" que operaba en corriente alterna de baja frecuencia.

En este tercer volumen de *The papers of Thomas A. Edison*, el de su instalación en Menlo Park, se nos revela la ambición, la finura mental y la confianza en sí mismo a los 29 años. Aquí, equipados con infraestructura suficiente para el desarrollo experimental, Edison y unos cuantos socios invirtieron veinte meses de investigación en la que aplicaron sus resultados anteriores en telegrafía hacia el teléfono neonato.

A lo largo de ese intervalo, Edison avanzó en tres frentes: en el telégrafo de transferencia acústica, el teléfono y la telegrafía séxtuple. El telégrafo de transferencia acústica de Edison era un nuevo tipo de sistema múltiple síncrono, que empleaba una suerte de compartición de tiempo de la línea de transmisión mediante conmutadores rápidos.

Su interés por el teléfono empezó a principios de julio de 1876. Se centró en el transmisor. En el sistema de Bell, la voz del locutor producía vibraciones en un diafragma metálico; el movimiento del diafragma creaba corrientes inducidas en el cable de la línea. Edison creía que tales corrientes eran demasiado débiles para el trabajo práctico y abordó el problema de una forma diferente. Buscaba una vía estable para causar la variación máxima en la señal. En sus primeros protototipos, los transmisores cambiaban la corriente de la línea mediante un diafragma vibrador. Muy pronto introdujo el carbono como conductor en un transmisor, revistiendo una superficie de caucho con grafito y conduciendo la corriente de la línea a través del revestimiento. Exploró otros aspectos del transmisor, tales como la forma del diafragma, su tamaño, ligereza, espesor y materia. Estudió diversos tipos de receptores. Por último, el propio circuito se convirtió en parte importante del teléfono; utilizó bobinas de inducción para reforzar la señal del transmisor.

En la primavera de 1877 acometió el sistema telegráfico séxtuple. Intentó que un receptor respondiera a las corrientes de señal de intensidades intermedias mientras que otro respondiera sólo a pulsos de corriente débil o intensa; y empleó su sistema de transferencia acústica para conmutar transmisores y receptores (abiertos, cerrados) muchas veces cada segundo a lo largo de la línea. Pese a algunos éxitos de laboratorio, Edison fracasó en su empeño de idear un sistema séxtuple.

España fue objetivo comercial de los inventos de Edison de este período. Frederic Ireland negoció los derechos de su patente de la pluma eléctrica en nuestro país en octubre de 1876; Theodore Puskas hizo lo propio con el teléfono y el fonógrafo en 1877 y George Prescott con el telégrafo cuádruplex. (L. A.)

Mecánica cuántica

Fundamentos

QUANTUM MECHANICS, AN INTRODUCTION, por W. Greiner. **QUANTUM MECHANICS, SYMMETRIES**, por W. Greiner y B. Müller. Springer, Berlín, Heidelberg, 1994.

Después de muchas décadas desde los primeros fundamentos de la teoría cuántica (si nos remontamos a la primera comunicación pública de la fórmula de Planck la fecha de nacimiento es el 14 de diciembre de 1900), el número de volúmenes que se han escrito sobre ella es inmenso.

Si nos quedamos en un primer nivel, es decir, obras que expliquen los fundamentos de la teoría con rigor y amenidad, nos encontramos con tres tipos de libros que podríamos agrupar en heterodoxos, actualizados y tradicionales. Los primeros tratan de dar un enfoque original a la presentación de la física cuántica. Los segundos incorporan sus aplicaciones más recientes en otras ramas de la ciencia y en algunas de la tecnología. En el tercero, el contenido es prácticamente constante a lo largo de las décadas. En las tres categorías hay libros buenos, aceptables y deleznables.

El autor de un libro introductorio de mecánica cuántica suele ser un profesor de la asignatura, de forma que el resultado es un manual encuadrado en una parcela rodeada de las otras disciplinas que forman el curriculum de la facultad de física en que enseñe. El libro de Walter Greiner de introducción a la mecánica cuántica es un buen texto tradicional que contiene lo exigible para iniciar los estudios completos de física teórica de la Universidad Johann Wolfgang Goethe de Frankfurt. El libro, lo mismo que el que comentaremos a continuación, forma parte de una extensa serie del mismo autor junto con diversos colaboradores. Le suceden *Quantum Theory* (Special Chapters), *Quantum Mechanics* (Symmetries), *Relativistic Quantum Mechanics, Field Quantization, Quantum Electrodynamycs, Quantum Chromodynamics, Nuclear Models, Gauge Theory of Weak Interactions* y le antecederán (aún están en preparación) dos tomos de mecánica y uno de electrodinámica y le bordea *Thermodynamics and Statistical Mechanics*. Esta gran serie comenzó a publicarse en alemán (incluidos los anunciados en preparación) entre 1980 y 1984.

Es difícil evaluar el contenido de un libro que forma parte de tan extensa y ambiciosa obra. Sin embargo, aisladamente, este texto tiene varias características, virtudes y defectos propios. De la ingente bibliografía introductoria de la mecánica cuántica, el autor ha elegido los fundamentos teóricos, apenas se ha preocupado de las aplicaciones a los sistemas físicos para los que se creó, ha despreciado las aplicaciones técnicas y ha ignorado en buena medida la descripción de los experimentos que la provocaron. Es una opción discutible si se piensa utilizarlo como manual de un curso general de introducción a la física cuántica para alumnos que después no van a seguir el camino de la física teórica, pero que necesitan una base de aquélla. Incluso en el caso anterior faltan aspectos cruciales como, por ejemplo, una introducción a la teoría de la dispersión.

Con todas estas limitaciones, el material elegido para conformar el libro es bueno, se hace con rigor y la presentación es equilibrada y bastante amena. Los ejercicios y ejemplos que se resuelven, en muchos casos tratan de cubrir algunas lagunas que hemos apuntado y en otros son desarrollos de la teoría presentada. Se echa de menos una colección de problemas de verdad con sus soluciones. Por todo lo dicho, estamos ante un libro que puede ser útil para el profesor por el rigor con el que presenta bastantes desarrollos matemáticos y algunos conceptuales. Para el estudiante siempre será un buen libro de consulta. Lo que difícilmente será es un libro de texto para un curso general de física cuántica, ni una fuente de consulta obligada de los fundamentos teóricos de la mecánica cuántica.

Caso muy distinto es el tomo siguiente al anterior de la serie de W. Greiner y colaboradores: *Quantum Mechanics, Symmetries*. Este es un libro de los que hemos llamado heterodoxos. Hace tiempo que no aparecía uno de mecánica cuántica enfocada exclusivamente a través de las simetrías y leyes de invariancia. Decía E. Wigner, el físico que mejor se percató de la importancia de estudiar las propiedades de simetría de los sistemas físicos y patriarca del desarrollo de las aplicaciones de la teoría de grupos a la física, que, si conociéramos las leyes fundamentales de la naturaleza o la ley fundamental, el estudio de las simetrías no nos aportaría nada. Hoy día se sabe que este sentido complementario o auxiliar del enfoque algebraico de los problemas físicos no es exactamente así. El entrelazamiento de propiedades geométricas y algebraicas de un sistema físico es tan estrecho, que prácticamente no se puede separar el estudio de unas y otras.



Autorretrato de Sin-itiro Tomonaga (1906-1979)

Lo normal en los libros generales de mecánica cuántica o de las ramas cuyo substrato forma, la física nuclear, la de partículas, la atómica, la molecular y la del estado sólido, es que se presenten en una formulación de ecuaciones diferenciales complementada por la teoría de grupos necesaria para explicar las propiedades de simetría e invariancia de los sistemas físicos. En el libro de Greiner y Müller se opta por una presentación clara, extensa y detallada del papel de las simetrías en la mecánica cuántica. Estamos, pues, ante un libro útil. Pero útil, ¿para quién? Para estudiantes de física que vayan a dedicarse al estudio postgraduado de la física de partículas y quizás algunos de los que elijan la física nuclear. En este último sentido es curioso que, siendo Greiner un físico cuya ingente labor investigadora se ha desarrollado sobre todo en ese campo, apenas dedica un capítulo, y no entero, al estudio de las simetrías en el núcleo atómico. Aún más, es en el núcleo en donde últimamente se han aplicado las simetrías dinámicas de forma más global y completa con el modelo de bosones en interacción. En el libro ni se menciona. Se pueden echar en falta desarrollos algebraicos aplicados a la molécula y a las otras ramas mencionadas antes. (M. L.)

Apuntes

Los extremos se tocan

El (*Z*)-7-dodecen-1-il acetato es una sustancia perteneciente al repertorio de feromonas que emplean las hembras de más de 126 especies de insectos, lepidópteros sobre todo, para atraer a los machos. No se trata de una molécula exclusiva de esos artrópodos. La hembra de elefante asiático, *Elephas maximus*, recurre a esa misma feronoma para indicarle al macho que está lista para la cópula. Quienes lo han descubierto ven en ese fenómeno un ejemplo espectacular de evolución convergente, al haberse sabido aprovechar las propiedades químicas de la molécula, en particular su carácter volátil.

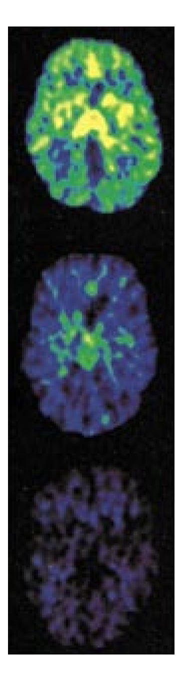
Visitantes del espacio exterior

Todos los asteroides y cometas conocidos nacieron y permanecen confinados en nuestro sistema solar. Por una sencilla razón. Carecen de la velocidad necesaria para escapar de la atracción gravitatoria del Sol. Pero así como los cometas son lanzados a veces lejos del sistema solar, cabría esperar que algún cometa impulsado a altas velocidades, y procedente de otras estrellas, penetrara en nuestro mundo. Si así fuera, el flujo de micropartículas interestelares hacia el sistema solar sería mayor que el de los cometas interestelares. Algo de ello acaban de observar en la atmósfera terrestre A. D. Taylor, W. J. Baggaley y D. I. Steel.

Mundo submarino, ¿mundo originario?

Los lectores de *Investigación y Ciencia* recordarán un artículo antológico sobre las archibacterias, o arqueobacterias, escrito por su descubridor Carl Woese. Se trata de unos microorganismos de tan peculiar constitución que configuran por sí solos un dominio propio en el reino de la vida. Ahora se ha secuenciado el genoma de un representante de ese grupo, *Methanococcus jannaschii*, que vive en los humeros oceánicos calientes, a una temperatura próxima al punto de ebullición del agua, se replica usando sólo compuestos inorgánicos y libera metano. De la secuenciación, realizada por Carol Bult, se desprende que la mayoría de sus genes carecen de equivalentes en otros organismos.

Humos cerebrales



Los cigarrillos son moneda de doble cara. Por un lado, la nicotina eleva los niveles de dopamina, molécula vinculada con el comportamiento adictivo. Por otro, cierta sustancia psicoactiva, todavía sin determinar, del humo del tabaco refuerza la adicción al inhibir la monoaminooxidasa B (MAO B), una enzima que degrada a la dopamina. El equipo que dirige Joanna S. Fowler en el norteamericano Laboratorio Nacional de Brookhaven descubrió que la actividad de la MAO B era, en los fumadores (*centro*), un 40 por ciento menor que en los no fumadores (*arriba*). Ahondando en la cuestión se halló que la deficiencia en MAO B de los fumadores resultaba similar a la observada en pacientes que tomaban L-deprenil, fármaco indicado para los enfermos de Parkinson (*abajo*). Tal coincidencia podría ser la razón de que los fumadores no acostumbren adquirir esa condición debilitante, que acompaña a los bajos niveles de dopamina.

Entre el dislate y la verdad

En carta reciente al editor de *Nature*, escribía M. F. Perutz: “Daedalus (autor de una columna semanal de fantasía científica) sugiere que los drogadictos deberían recibir los genes apropiados de la adormidera o de la coca que les permitiera sintetizar endógenamente los narcóticos. Existe un camino más sencillo: poseemos ya los genes que determinan la encefalina, productora de un efecto similar. Lo que Daedalus debería inventar es la forma de que ello ocurra a voluntad.”

Sin referencia

Abundan en la naturaleza fenómenos que muestran un comportamiento similar en una gama de escalas muy amplia. La estructura fractal se ha convertido a este respecto en el ejemplo paradigmático. Para justificar ese comportamiento, se apela a la “criticalidad autoorganizada” (CAO), idea basada en la dinámica de un montón de granos de arena. Pero resulta que la autoorganización se cumple en los modelos de ordenador, no en los montones reales. Al menos no en todos. En efecto, si de la arena pasamos al arroz, sólo se respeta esa dinámica cuando los granos del cereal tienen cierta longitud, no si son más redondeados.

Bicentenario feliz

A estas alturas de la historia de la humanidad, cada mes de cada año podríamos celebrar algun episodio notable. Pocos, sin embargo, con mayor motivo que el correspondiente a este mes de mayo en que se cumple el bicentenario de la vacuna contra la viruela. Gracias al gesto de Edward Jenner, que se inoculó un extracto infectado de vaca, muchos niños se han salvado de una muerte segura.